



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**VÝVOJ ZDICÍCH PRVKŮ NA BÁZI LEHKÉHO
KAMENIVA Z PĚNOVÉHO SKLA**

DEVELOPMENT OF MASONRY COMPONENTS BASED ON LIGHT FOAM GLASS BASED
AGGREGATE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bronislav Pěček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Bronislav Pěček
Název	Vývoj zdicích prvků na bázi lehkého kameniva z pěnového skla
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] HALAHYJA, M.; CHMÚRNY, I.; STERNOVÁ, Z. Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 1998. 253 s. ISBN 80-88905-04-4.
- [2] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J. Zkoušení izolačních materiálů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X
- [3] Vaverka, J.; Chybík, J., Mrlík, F. Stavební fyzika 2, stavební tepelná technika. 1. vyd. Brno: VUTUM, 2000. 420 s. ISBN 80-214-1649-1.
- [4] Kießl, K. Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation Essen 1983.
- [5] Künzeli, H. M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One – and two-dimensional calculation using simple parameters. PhD Thesis. Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.
- [6] ČSN EN 1745 Zdivo a výrobky pro zdivo – Metody stanovení návrhových tepelných hodnot

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Bakalářská práce se bude zabývat možnostmi využití lehkého kameniva na bázi pěnového skla pro výrobu zdicích tvarovek. Cílem bude především provedení literární rešerše a posouzení možnosti uplatnění lehkého betonu z kameniva na bázi pěnového skla při výrobě pokročilých zdicích tvarovek. Dále pak vypracování teoretického návrhu zdicích tvarovek s ohledem na klíčové oblasti potenciálního uplatnění těchto výrobků ve stavební praxi. V neposlední řadě pak bude cílem práce navrhnout vhodnou recepturu lehkého betonu pro výrobu navržených zdicích tvarovek a provedení ověření vlastností betonu i tvarovky pomocí praktických experimentů.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vývojem zdicích prvků z lehkého kameniva na bázi pěnového skla. Teoretická část se věnuje jak účelu zdicích prvků, tak popisu různých materiálů, ze kterých jsou vyrobeny, hlavně pak lehkého kameniva na bázi pěnového skla. V praktické části je navrženo tvarové uspořádání tvarovky a ověřeny fyzikální vlastnosti pomocí receptur, které byly použity při návrhu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pórovité kamenivo, zdicí prvky, pěnové sklo, svislé konstrukční prvky

ABSTRACT

Bachelor's thesis covers development of masonry components based on light foam glass aggregate. Theoretical part pursues purpose of masonry components and description of different materials from which they are made of, mainly light foam glass aggregate. Practical part, focuses on design of shape arrangement of masonry component and verifies mechanical properties of material, which was used in design.

KEYWORDS

Porous aggregates, masonry components, foam glass, vertical construction components

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bronislav Pěček *Vývoj zdicích prvků na bázi lehkého kameniva z pěnového skla*. Brno, 2018. !!XX!! s., !!YY!! s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 1. 5. 2018

Bronislav Pěček
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Zachovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

Obsah

I	TEORETICKÁ ČÁST	12
1	Úvod	12
2	Tepelná ochrana budov	12
3	Svislé konstrukce	17
	3.1. Monolitické systémy	19
	3.2 Prefabrikované systémy	19
	3.3 Zděné systémy	20
4	Zděné konstrukce dle typu materiálu	22
	4.1 Pálené zdicí prvky	24
	4.2 Vápenopískové zdicí prvky	26
	4.3 Betónové tvárnice s hutným anebo pórovitým kamenivem ...	27
	4.4 Pórobetónové tvárnice	28
5	Lehké betony	30
	5.1 Mezerovitý lehký beton	30
	5.2 Pojiva mezerovitého betonu	31
	5.2.1 Cement	31
	5.3 Nepřímo lehčené betony	33
6	Druhy lehkého kameniva pro výrobu lehčených betonů	33
	6.1 Keramzit	33
	6.2 Lehké kamenivo z Perlitu	35
	6.3 Lehké kamenivo z expanovaného obsidánu	35
	6.4 Lehké kamenivo z pěnového skla	36
	6.4.1 Výroba lehkého kameniva z pěnového skla	37

6.4.2	Využití lehkého kameniva na bázi pěnového skla ...	39
II	PRAKTICKÁ ČÁST	41
7	Cíl práce	41
8	Metodika práce	41
8.1	Návrh tvarovky z mezerovitého betonu	42
8.2	Návrh vstupních surovin	43
8.2.1	Muraplast FK 19	43
8.2.2	Expandovaný obsidán Termosilit	43
8.2.3	Lehké kamenivo z pěnového skla Refaglass	44
8.3	Zkušební receptury	45
8.4	Zkušební těleso	46
8.5	Zkoušky na čerstvém betonu	47
8.5.1	Stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu	47
8.6	Zkoušky na ztvrdlém betonu	47
8.6.1	Stanovení objemové hmotnosti na ztvrdlém betonu	47
8.6.2	Stanovení pevnosti v tlaku	48
8.6.3	Stanovení součinitele tepelné vodivosti	49
8.7	Výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti	50
9	Vyhodnocení	53
9.1	Diskuze výsledků	58
10	Závěr	60
11	Literatura	61

Seznam obrázků

Obrázek 1: Možnosti řazení otvorů ve směru tepelného toku [4]	16
Obrázek 2: Lehké kamenivo z keramzitu frakce 4-16 [21]	34
Obrázek 3: Frakce pěnového skla [27]	37
Obrázek 4: Pěnové sklo technologií firmy Liaver [29]	39
Obrázek 5: Pěnové sklo dávkované objemově do míchačky	44
Obrázek 6: Detail porušeného vzorku po provedení zkoušky pevnosti v tlaku	49
Obrázek 7: Tvarové uspořádání a tabulka využití u návrhu tvarovky [3] ..	51
Obrázek 8: Tvarové uspořádání tvarovky s tloušťkou 380 mm	57

Seznam tabulek

Tabulka 1: Receptury na 1 m ³ betonu	45
Tabulka 2: Receptury na 40 l betonu	46
Tabulka 3: Zhodnocení receptur na základě vlastností použitých při návrhu	52
Tabulka 4: Vlastnosti čerstvého lehkého betonu daných receptur	53
Tabulka 5: Vlastnosti ztvrdlého lehkého betonu daných receptur	54
Tabulka 6: Součinitelé tepelné vodivosti u navržených receptur	56
Tabulka 7: Srovnání námi navržené tvarovky s hlavním konkurentem ..	59
Tabulka 8: Tvarové uspořádání a vlastnosti tvarovky	59

Seznam grafů

Graf 1: Sítový rozbor Thermosilt	44
Graf 2: Závislost součinitele tepelné vodivosti materiálu na součiniteli Tepelné vodivosti tvarovky	51
Graf 3: Závislost objemové hmotnosti čerstvého lehkého betonu na recepturách	53
Graf 4: Závislost objemové hmotnosti ztvrdlého lehkého betonu na recepturách	55
Graf 5: Závislost pevnosti v tlaku ztvrdlého lehkého betonu na recepturách	55
Graf 6: Závislost součinitele tepelné vodivosti lehkého betonu na recepturách	56

I TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD

V době, kdy je kladen velký důraz na recyklaci materiálů a jejich obnovitelnost, se naskýtá mnoho řešení, jak znovu využít odpady průmyslové produkce. Jedním z nich je i pěnové sklo, které je vyráběno z recyklátu skla, a ukončuje tak recyklační cyklus tohoto materiálu. Když k tomu přičítáme vynikající pevnostní a tepelně-izolační vlastnosti, vzniká tak konkurenceschopný stavební materiál moderní doby.

Pevnostní a tepelně-izolační vlastnosti jsou dány pórovitou strukturou pěnového skla, kdy póry vznikají napěňovací přísadou, obalených skelnou fází, vytvořenou ze skelné moučky, za vysokých teplot.

Úkolem této práce je vytvořit tvarovku z lehkého kameniva na bázi pěnového skla, tak aby vyhovovala jak normám, tak i modernímu trendu v oblasti tepelně úsporných staveb. Vytvořením rešerše je třeba si upřesnit účel zdicích prvků ve stavbách a také porovnaní různých materiálů, ze kterého jsou tvarovky vyráběny, hlavně co se týče pevnostních a tepelně-izolačních vlastností.

Z praktického hlediska je cílem vytvoření takové receptury a tvarového uspořádání tvarovky, aby bylo možné její využití v nosných konstrukcích staveb a zároveň vyhovovala novodobým požadavkům na tepelnou ochranu budov.

2 TEPELNÁ OCHRANA BUDOV

Potřebné technické požadavky na stavby stanovuje vyhláška č.268/2009 Sb. a ve znění následujících předpisů. Mimo jiné jsou zde uvedeny požadavky na úsporu energie a tepelnou ochranu. Provedení budovy musí být takové, aby spotřeba energie na její vytápění, větrání, umělé osvětlení případně klimatizaci byla co nejnižší. Energetická náročnost se ovlivňuje použitými materiály a výrobky, tvarem budov, orientací a velikostí výplní otvorů, dispozičním řešením a systémy technického zařízení budov.

Budovy s požadovaným stavem vnitřního prostředí musí být navrženy a provedeny tak, aby byly dlouhodobě po dobu jejich užívání zaručeny požadavky na jejich tepelnou ochranu splňující:

- a) tepelnou pohodu uživatelů,
- b) požadované tepelně technické vlastnosti konstrukcí a budov,
- c) tepelně vlhkostní podmínky technologií podle různých účelů budov,
- d) nízkou energetickou náročnost budov. [1]

Specifikace požadavků na tepelně technické vlastnosti budov dle normy ČSN 730540-2. následovné:

Šíření tepla konstrukcí

- Nejnižší vnitřní povrchová teplota
- Součinitel prostupu tepla
- Pokles dotykové teploty podlahy

Šíření vlhkosti konstrukcí

- Zkondenzovaná vodní pára uvnitř konstrukce
- Roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry uvnitř konstrukce

Šíření vzduchu konstrukcí a budovou

- Průvzdušnost
- Větrání místností

Tepelná stabilita místností

- Pokles výsledné teploty v místnosti v zimním období
- Tepelná stabilita místností v letním období

Tato norma se mimo jiné zabývá nejnižší povrchovou teplotou v budovách v prostorách s relativní vlhkostí $\varphi_i \geq 60 \%$, stanovením kritického teplotního faktoru vnitřního povrchu, poklesem dotykové teploty podlahy, zkondenzovanou vodní párou uvnitř konstrukce, průvzdušností spár a netěsností konstrukcí obálky budov, intenzitou výměny vzduchu místností, poklesem výsledné teploty v místnosti v zimním období, tepelnou stabilitou místnosti v letním období a součinitelem prostupu tepla.

Součinitel prostupu tepla se u budov hodnotí dvojím způsobem (přičemž oba níže uvedené požadavky musí být splněny):

- pro jednotlivé konstrukce U [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
- pro budovu jako celek pomocí průměrného součinitele prostupu tepla U_{em} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

Dle článku 5.2.1 ČSN 73 0540-2 musí mít konstrukce vytápěných budov s návrhovou relativní vlhkostí vnitřního vzduchu $\varphi_i \leq 60 \%$, součinitel prostupu tepla U takový, aby splňoval podmínku:

$$U \leq U_N$$

kde: U_N je požadovaná hodnota součinitele prostupu tepla ve $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Požadované hodnoty součinitele prostupu tepla pro prostory s převažující vnitřní teplotou θ_{im} v intervalu $+18 \text{ }^\circ\text{C}$ až $+22 \text{ }^\circ\text{C}$ jsou uvedeny jako $U_{N,20}$ v tabulce č. 3 v ČSN 73 0540-2. Pro budovy s odlišnou převažující návrhovou vnitřní teplotou je nutné hodnoty U_N stanovit dle vztahu:

$$U_N = U_{N,20} \cdot e_1$$

kde: e_1 je součinitel typu budovy, který se stanoví z převažující návrhové vnitřní teploty θ_{im} dle vztahu: [2]

$$e_1 = 16 / (\theta_{im} - 4)$$

Dle vyhlášky č. 78/2013 Sb. a ve znění následujících předpisů o energetické náročnosti budov, je kladen důraz na úspory spotřeby energií, a to zvýšením tepelně-izolačních vlastností budov. Důvodem je nízká úroveň tepelných vlastností

u stávajících staveb. Vlivem nedostatečné energetické ochrany budov vznikají tepelné mosty, kudy proudí nežádoucí tepelný tok a způsobuje únik tepla. Tím se zvyšuje spotřeba energie za vytápění. Právě v místech tepelných mostů mohou poté vznikat hygienické nedostatky konstrukce (plísňě), zvláště v zimním období, kdy je snížena teplota vnitřního vzduchu.

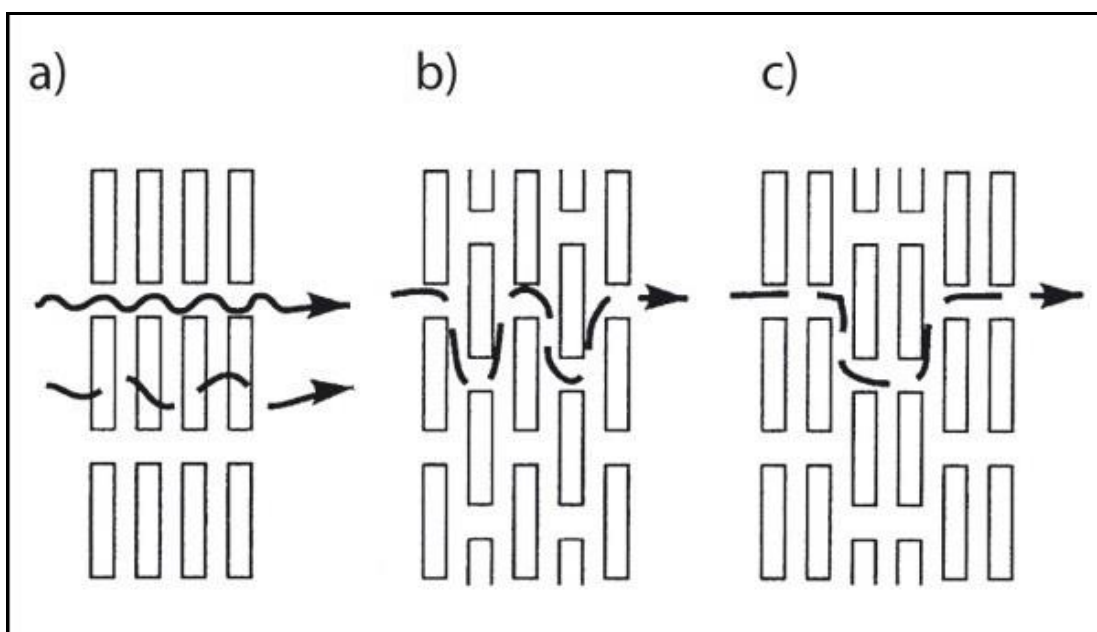
Užitím dodatečné tepelné izolace nebo inovací stavebního materiálu získáme lepší tepelnou pohodu v místnostech, dále se vyhneme hygienickým nedostatkům, zvláště ve styčných stavebních konstrukcích a snížíme spotřebu energie, která je vynaložena na vytápění budovy. Přidanou hodnotu je zlepšení vizuálního charakteru budovy a také fakt, že snížením spotřeby paliv potřebných na výrobu tepelné energie, šetříme životní prostředí.

Za tímto účelem je zpracován návrh, který musí mít taková technická řešení, aby splňoval požadavky na celoroční chod budovy. Zajištěním požadavků se rozumí zabezpečení tepelné pohody vnitřního, jak obytného, tak pracovního prostředí budovy, umožnění chovu zvířat a pěstování rostlin, zabezpečení očekávané doby životnosti budovy prevencí vůči tepelně technickým a hygienickým poruchám a samozřejmě úsporu tepelných energií.

Tepelné vlastnosti zdicích prvků a jejich výpočet je uveden v normě ČSN EN 1745.

Tyto vlastnosti musí být uváděny souběžně s tepelnou veličinou, aby bylo možné správně interpretovat výsledky zkoušek a porovnávat tepelné vlastnosti zdiva z různých typů zdicích prvků. Těmito vlastnostmi u zdicích prvků jsou:

- typ zdicího prvku LD/HD
- objemová hmotnost v suchém stavu v kg.m^{-3}
- hmotnostní vlhkost v %
- střední teplota pro měření tepelného odporu v $^{\circ}\text{C}$
- rozměry a tvar zdicích prvků, což znamená – počet řad otvorů, počet otvorů v řadě, řazení otvorů ve směru tepelného toku, tvar otvorů, tloušťka obvodových a vnitřních žebér – odvozených z normy ČSN EN 1745 příloha B.[3]



Obrázek 1: Možnosti řazení otvorů ve směru tepelného toku [4]

Tepelné vlastnosti zdicích prvků je ovlivněno tvarovým uspořádáním prvků. Pro zvýšení tepelně-izolačních vlastností je při návrhu nutné dbát, aby vzduchové otvory nebyly řazeny hned za sebou. Při takovém řazení otvorů umožňujeme tepelnému toku přímou cestu materiálem s nižším tepelným odporem (viz. obr. 9 a)). Pokud seřadíme otvory dle obr. 9 b), tvoříme tepelnému toku překážku, a tím zvyšujeme tepelný odpor dílce, avšak snižujeme pevnost dílce v tlaku. Obr.9 c) je alternativou mezi předchozími možnostmi, se střední hodnotou tepelného odporu a pevnosti v tlaku.

Dalším vlivem na tepelně-izolační vlastnosti zdicích prvků je šířka prvku. S narůstající šířkou prvku, roste i tepelný odpor, a tím se zvětšuje tepelná ochrana budovy. Zároveň roste i hmotnost dílce, která zvyšuje náročnost uložení prvku na stavbě a také narůstá cena za materiál.

Možnost, jak zvýšit tepelný odpor tvarovek, je zvětšení šířky vzduchových otvorů ve tvarovce ve směru tepelného toku. Tímto způsobem zvětšujeme překážku, kterou musí tepelný tok obejít, a tím zpomalujeme odchod tepla z konstrukce.

Celkovým zvětšením mezer, snížíme objemovou hmotnost dílce, a tím pádem zvětšíme tepelný odpor zdiva. Se zvyšující se objemovou hmotností tvarovek však snižujeme jejich pevnost v tlaku a celkovou nosnost zdiva.

Vzduchové mezery lze nahradit materiály, které mají větší tepelný odpor jako vzduch a tím ještě navýšit tepelně-izolační vlastnosti tvarovky. Těmito materiály bývá extrudovaný polystyrén nebo minerální vlna. [4] [5]

3 SVISLÉ KONSTRUKCE

Svislé a vodorovné konstrukce vytváří důležitou součást nosného konstrukčního systému. Hlavními funkcemi svislých konstrukcí jsou funkce nosné a ztužující, kdy se převádí vertikální síly z vodorovných konstrukcí do základů, tedy jsou namáhány hlavně tlakovým napětím. Svislé konstrukce lze rozdělit tvarově na: stěny – kde plošné a výškové rozměry převládají nad rozměrem tloušťkovým, sloupy – tedy tyčové prvky, kde výškový rozměr převládá nad šířkou a tloušťkou a dále pilíře - které jsou považovány za masivnější sloupy. Zatížení je rozloženo buď liniově (stěny) nebo bodově (sloupy).

Svislé konstrukce plní i funkci tepelně-izolační - oddělují plochy s různou teplotou prostředí a tím způsobují tepelný komfort v místnostech. Způsob, jak lze dosáhnout těchto tepelně-izolačních vlastností je zmenšování hmotnosti staviva, tedy vytvářením mezer ve struktuře stavebního materiálu.

Vylehčit stavební materiál lze buď přímo, vnášením pórů z plynu nebo pěny přímo do cementové matrice – výhodou je homogenita materiálu, tedy stejné vlastnosti po celé ploše. Úskalím pak je menší pevnost materiálu a složitější technologie výroby. Nepřímým způsobem vylehčení se rozumí vytvoření stavebního materiálu z lehkého kameniva (liapor, perlit), a obalení cementovým tmelem. Tento materiál má sice lepší pevnostní vlastnosti, ale mnohem jednodušeji se v něm vytváří tepelné mosty. Materiál je možné také vylehčit vyrobením tvarovek s vyřezanými dutinami, které jsou vyplněny vzduchem nebo tepelně-izolačními materiály. Následkem vylehčení dochází pak ke snížení pevností a nosnosti konstrukce. Proto nemusí být dosaženo těchto tepelně-izolačních vlastností pouze nosným materiálem, ale i přidáním účinné tepelně-izolační vrstvy, jako například tepelně – izolační omítky či izolační desky z polystyrenu při výrobě anebo montáži. Svislé konstrukce, zvláště pak stěnové systémy vytváří díky relativně vysoké plošné hmotnosti i akustickou izolaci prostor. Další důležitou funkcí svislých konstrukcí je protipožární funkce, kdy je zapotřebí vytvářet konstrukci z nehořlavého materiálu nebo opatřit ji ochranou proti požáru. Stěnové systémy dělí stavbu na požární úseky a vytváří tak bezpečné únikové cesty. [6]

Stěnové systémy se dělí na:

- monolitické
- prefabrikované
- zděné

3.1 Monolitické systémy

Jsou vytvářeny ukládáním čerstvé betonové směsi do bednění přímo na místě realizace stavby, přičemž bednění je po ztuhnutí směsi rozloženo a odstraněno, anebo nadále zůstává součástí stavby. Prostý beton se používá jen na stěnové systémy, které jsou namáhány hlavně tlakem. U konstrukcí, kde vzniká ohyb a tah se realizuje železobetonová monolitická výstavba. Prvním krokem při výstavbě monolitických stěn je příprava bednění, kde je následně zabudována výztuž a poté je bednění vyplněno předem připraveným čerstvým betonem, přiváženým z betonárky v autodomíchavačích. Po zatuhnutí směsi je beton dále ošetřován, aby dosáhl požadovaných fyzikálních vlastností. Bednění udává tvar konstrukce a zároveň dělí výstavbu na určité etapy, dle požadavku technologického postupu stavby. [6]

3.2 Prefabrikované systémy

Prefabrikované betonové stěny jsou vyráběny předem v betonárnkách v požadované velikosti a poté se dovážejí k zabudování na stavbu.

Prefabrikované stěny mohou být z keramiky, betonu anebo oceli. Platí pravidlo, že výsledné chování konstrukce by mělo odpovídat monolitické konstrukci. Montované svislé konstrukce musí splňovat požadavky nosnosti, je potřeba brát zřetel na to, že dílce jsou spojovány až na stavbě spojovacími prvky, které mají různé materiálové vlastnosti. [6]

Důležité jsou:

- přenos normálových sil
- rovnoměrné rozdělení vypovídajícího napětí,
- přenos smykových sil,
- zamezení vzniku tepelných a akustických mostů.

Výhodou prefabrikované stavby je rychlost montáže – předem vyrobené dílce jsou na stavbě zabudovávány a spojovány se zanedbatelným vlivem vnějšího prostředí. Výrobou v halách je možné zaručit přesnost a kvalitu povrchu výrobku.

Nevýhodou jsou háky pro manipulaci u osazování, které jsou součástí stěnových prefabrikovaných systémů, a které způsobují kvůli mezerám tepelné mosty. Jednovrstvé stěny nesplňují tepelně-technické parametry pro obvodové konstrukce, protože se Panely navrhuji z prostého betonu anebo železobetonu. [6]

3.3 Zděné systémy

Systém zděných konstrukcí je vytvářen záměrným skládáním zdicích prvků z přírodních nebo umělých materiálů, které jsou spojovány maltou nebo na sucho.

(1) Stavba musí být navržena a provedena tak, aby byla při respektování hospodárnosti vhodná pro určené využití a aby současně splnila základní požadavky, dle sb. 268/2009 ve znění návazných předpisů:

- a) mechanická odolnost a stabilita,
- b) požární bezpečnost
- c) ochrana zdraví osob a zvířat, zdravých životních podmínek a životního prostředí
- d) ochrana proti hluku
- e) bezpečnost při užívání,
- f) úspora energie a tepelná ochrana.

(2) Stavba musí splňovat požadavky uvedené v odstavci 1 při běžné údržbě a působení běžně předvídatelných vlivů po dobu plánované životnosti stavby.

(3) Výrobky, materiály a konstrukce navržené a použité pro stavbu musí zaručit, že stavba splní požadavky podle odstavce 1. [2]

Požadované funkce určují minimální rozměry zdicích prvků. Kombinací vlastností malty a materiálu, ze kterého je zdivo vyrobeno se pak dosáhne výsledných vlastností zděné konstrukce. Výslednou pevnost nabyde zdivo ihned (při suché výstavbě), anebo po zatvrdnutí malty (za použití mokrého způsobu).

Malta jako spojovací materiál je směsí pojiva (obyčejné nebo hydraulické vápno, cement) a plniva (písek a voda). Dělí se pak podle množství pojiva a konečné pevnosti:

- vápenné (MV) – pevnost tlaku max. $1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ se dosáhne až po 90 - ti dnech
- vápenno-cementové malty (MVC) – pevnost tlaku $1-2,5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$
- cementové malty (MC) – pevnost tlaku $5-15 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$

Dalším faktorem výsledné pevnosti zdiva je uspořádání zdicích prvků, které má vliv na rovnoměrné rozložení tlaku. Jednotlivé prvky se ukládají do vodorovných vrstev, tak aby se zamezilo průběžným svislým spárám. Zděná konstrukce nemá homogenní charakter, jelikož zdicí prvky a malta mají různé moduly pružnosti a různé součinitele přetvárnosti. [6]

Znamená to, že za různých vlivů prostředí je dilatace materiálů různá a mohou tak vznikat vnitřní napětí v místě spojů. Jsou později často příčinou prasklin a v důsledku toho může dojít k narušení statické funkce.

Po určitém násobku vrstev se vkládají výstužné prvky z kruhové nerezové výztuže, čím se dosáhne lepších mechanických vlastností.

Většina stavebních materiálů, pro výrobu zděných konstrukcí splňuje pevnostní podmínky. Jsou dobrými vodiči tepla a pro zlepšení tepelně–izolačních vlastností zdicích prvků je potřeba zdivo vylehčit: buď konstrukčními dutinami v dílci, anebo vnášením pórů přímo do materiálu, ze kterého je zdicí prvek vyráběn. Následkem toho se však sníží pevnost a tím i statická funkce konstrukce. Proto se nanášejí další vnější vrstvy zdicího systému s funkcí tepelně a zvukově izolační. Obvodová konstrukce musí splňovat minimální hodnoty pro tepelný odpor $R = 3 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$. Výsledná hodnota odporu je hodnota součtu odporů všech vrstev obvodové stěny. [6]

Vnější vrstvy obvodové konstrukce jsou:

- 1) kontaktní pláště
- 2) skládané pláště
- 3) lícové zdivo

4 ZDĚNÉ KONSTRUKCE DLE TYPU MATERIÁLU

Vývoj zdicích prvků začíná vytvořením tvarovky z nového materiálu. První fázi vývoje bývá plná tvarovka určitých rozměrů. V této fázi vývoje se stále upravuje receptura tvarovky, tak aby měla co nejlepší pevnostní a tepelně-izolační vlastnosti, což jsou hlavní atributy, které jsou od zděné konstrukce vyžadovány. S tím se i zvětšuje velikost tvarovky, do takových rozměrů, u kterých je pracnost výstavby ještě realizovatelná.

Po dosažení maxima materiálu, co se týče hlavně tepelně-izolačních vlastností, nastává další krok, a to snížení objemové hmotnosti prvku, tedy vylehčení tvarovky. Toho je zpočátku dosaženo, vnesením lehčiv do materiálu. Přímých, které vytvoří póry, ale v konečném výrobku nefigurují, jsou totiž během nějaké části procesu tepelně nebo chemicky odstraněny (například při výpalu keramického střeptu piliny sloužící jako lehčivo vyhoří), nebo nepřímých, kde se přidává vylehčující materiál, který už póry obsahuje a je součástí výsledného zdicího prvku. Dalším vývojovou fází tvarovek bývá vylehčení úmyslným vytvořením vzduchových dutin. Pro zvýšení tepelně izolačních vlastností je důležité navrhnout jak správnou šířku vzduchových dutin, tak i správné uspořádání, aby budova měla co nejmenší součinitel prostupu tepla. Moderním trendem ve vývoji tvarovek je vložení tepelně-izolačních materiálů v posledním kroku procesu. Tyto mají nižší součinitel tepelné vodivosti než vzduch. Se snižující se objemovou hmotností zdicích prvků, klesá ale i jejich pevnost.

Dalším vývojovou fází tvarovek bývá vylehčení, úmyslným vytvořením vzduchových dutin. Pro zvýšení tepelně-izolačních vlastností je důležité navrhnout jak správnou šířku vzduchových dutin, tak i správné tvarové uspořádání, aby budova měla co nejmenší součinitel prostupu tepla. Moderním trendem, tedy posledním krokem ve vývoji tvarovek, je vložení tepelně-izolačních materiálů,

kteří mají nižší součinitel tepelné vodivosti než vzduch. Se snižující se objemovou hmotností zdicích prvků, klesá i jejich pevnost.

Tento moderní trend se využívá hlavně při výstavbě pasivních domů, tedy domů s nízkou energetickou náročností. Tyto mají měrnou plošnou potřebu tepla okolo 15 kWh/m²/a. Pro představu standartní stavby mají měrnou plošnou potřebu tepla 80 až 145 kWh/m²/a. Měrná plošná spotřeba tepla je veličina definující spotřebu energie v kWh pro vytápění 1 m² podlahové plochy za rok. Hodnota u pasivních domů je tak nízká, že se zde projevují sebemenší zdroje tepla jako například elektrické spotřebiče, běžným provozem nebo přítomnost osob.

Hlavní příčinou jsou solární zisky (okna s izolačním trojsklem a dokonale izolovanými rámy, a právě moderní zdicí prvky. Těmito moderními zdicími prvky jsou tvarovky s výplní z minerální vaty nebo polystyrénu, s vysokými tepelně-izolačními vlastnostmi v jednovrstvých konstrukcích bez nutnosti dodatečného zateplení. Nosný materiál (keramika, beton) má ochrannou funkci v tvarovce, kdy chrání izolační výplň (polystyrén, minerální vata). Hodnota součinitele prostupu tepla je u těchto tvarovek mezi 0,14 až 0,22 W·m⁻²·K⁻¹, s ohledem na tloušťku a typ zdicího prvku. [5]

U pálených zdicích prvků se začíná používat ještě hydrofobizační vrstva, která chrání prvek proti nasáknutí vody stojící na základové nebo stropní desce. [7]

Specifikace zdicích prvků je podle normy následující:

- ČSN EN 771-1 Specifikace zdicích prvků – Část 1: Pálené zdicí prvky
- ČSN EN 771-2 Specifikace zdicích prvků – Část 2: Vápenopískové zdicí prvky
- ČSN EN 771-3 Specifikace zdicích prvků – Část 3: Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem
- ČSN EN 771-4 Specifikace zdicích prvků – Část 4: Pórobetonové tvárnice
- ČSN EN 771-5 Specifikace zdicích prvků – Část 5: Zdicí prvky z umělého kamene
- ČSN EN 771-6 Specifikace zdicích prvků – Část 6: Zdicí prvky z přírodního kamene [4]

4.1 Pálené zdicí prvky

Specifikací pálených zdicích tvarovek se zabývá norma ČSN EN 771-1. Počátky cihly se datují do období 8 500 až 7 500 před naším letopočtem, kdy se budovaly stavby z tvarovek z hlíny. Ty byly většinou jen vysušené, nevypalovaly se. Výstavba z pálených cihel získala na oblibě kvůli své odolnosti vůči živlům a požáru. Tehdejší materiály ze dřeva či jiných hladkých materiálů neobstály. Dalším důvodem byl nedostatek kamene pro stavby, který v té době byl hlavním stavebním materiálem.

Cihla se poté vyvíjela, začala se pálit, aby dosáhla lepších pevnostních vlastností. Největší průlom v používání pálené cihly však nastal až v 19. století v časech průmyslové revoluce, kdy vznikal tlak na rychlejší výstavbu a lehčí manipulaci s materiálem. V tomto období vznikají první lehčené pálené cihly, které jsou odlehčeny dutinami. Vylehčení umožňuje používat cihly do stropních konstrukcí např. keramobetonové stropy, kde cihelné tvarovky plní funkci ztraceného, betonem zalitého bednění. Dříve se cihly vylehčovaly lehčivý (piliny), které vyhořely během výpalu a zanechaly dutiny. Cihla získává dobré tepelně-izolační a mrazuvzdorné vlastnosti.

Dalším postupem, jak získat dobré tepelně-izolační vlastnosti je děrování cihel v podélném anebo příčném směru. Počátkem 50-tých let 20-tého století dochází k rozmachu tzv. voštinových cihel, jsou děrované a mají na tu dobu vysoké tepelně-izolační vlastnosti. Nástupem požadavků na rychlou výrobu se upouští od výstavby z cihelného zdiva. Nástupem nových norem, specifikujících tepelně-izolační vlastnosti konstrukcí a jejich postupným zpřísňováním se pálené zdicí prvky začali opět využívat.

Škála výrobků se začala rozšiřovat a technologie výstavby se zrychlovaly. Důsledkem byl růst velikosti tvárnic. Ustálil se pak v rozměrech, vyjma šířky. Výstavbu urychluje změna styku tvárnic – typ styku pero-drážka. Ustupuje se od klasického maltování v ložných spárách. To je nahrazeno tenkovrstvou maltou tloušťky jednoho milimetru. Později je vyvinuta technologie výstavby zdicího systému zcela bez malty, a to zdicí pěnou Dryfix. Tato ještě zrychlila výstavbu a umožnila zdění během zimního období do teplot 5°C.

Posun v tepelně-izolačních vlastnostech tvarovek nastal díky výplni keramického střepu. Nejprve se zdicí prvky vylehčovaly lehkým betonem, hlavně z perlitu. Zlepšením mechaniky a robotiky, přišla možnost vyplňování dutin polystyrénem a následně minerální vlnou. Lehčení zdiva dříve mělo za následek snížení pevnosti, ale popsaná konstrukce tvarovky i přes menší šířku zvyšuje pevnost a zajišťuje vyšší akumulaci tepla a povrchovou teplotu, která přispívá tepelné pohodě v prostorách. [7] [8] [9]

Na trhu se nabízí více typů materiálů pro zděné konstrukce. Vyznačují se různými vlastnostmi. Nejdůležitější jsou objemová hmotnost – z této vychází pevnost (hlavně v tlaku) a tepelně-izolační vlastnosti. Dalšími sledovanými hodnotami jsou zvukově-izolační vlastnosti, odolnost proti požáru, propustnost vodních par, nasákavost a mrazuvzdornost.

Pálené zdicí prvky jsou na tom nejlépe na trhu, co se týče kombinace pevnostních tak tepelně-izolačních vlastností. Keramické tvarovky dosahují pevnosti $6\text{--}8 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a ekvivalentní hodnoty tepelné vodivosti $0,064\text{--}0,115 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, odvíjející se podle šířky tvarovky. Díky těmto vlastnostem dominují trhu se zdicími prvky. Hlavní nevýhodou je nerovinnost povrchu keramických tvarovek, zvláště pak na lícové straně. Kvůli této nerovinnosti nelze nanášet tenkovrstvá omítka a stále se musí používat typ pojící hmoty do ložné plochy, což má za následek vznik tepelných mostů v místech pojení. Vývin pojících hmot, už dospěl do fáze tenkovrstvých zdicích malt a polyuretanových lepidel, které vytváří pouze tenkou plochu pro únik tepla z budovy. [7] [8]

Významnými výrobci keramických zdicích jsou v ČR: Wienerberger prodávající výrobky pod obchodním názvem **Porotherm** a firma Heluz, která své výrobky označuje obchodním názvem **Heluz**. [7] [8]

4.2 Vápenopískové zdicí prvky

Specifikací vápenopískových zdicích prvků se zabývá norma ČSN EN 771-2

Specifikace vápenopískových zdicích prvků je uvedena v normě ČSN EN 771-2. Vápenopískové zdicí prvky se vyrábí ze základních surovin vápno, křemičitý písek a voda. Suroviny se míchají v míchačkách, kde je možné docílit požadovaného zbarvení přidáním pigmentu. Poměr vápna a písku je 1:10. V reaktoru dochází k celkovému zreagování vzdušného vápna na hydroxid vápenatý - čas reakce je cca 2 hodiny. Směs se znovu promíchá, případně dovlhčí a v plně automatickém lisu vlisuje do forem dle požadovaných rozměrů. Různých objemových hmotností není dosaženo druhem materiálu, ale vytvořením dutin ve tvarovce. Proces vytvrzování tvarovek v autoklávech jako následná výrobní operace probíhá za podmínek: tlak páry $1,6 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, teplota cca $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a času: 8-10 hod. V prvních dvou hodinách se zvyšuje teplota a tlak, 4-6 hodin se pak drží maximální hodnoty a následně 2 hodiny tlak i teplota klesají. Díky tomu, že jsou kotle vzájemně propojeny se pára propouští z jednoho potrubí do druhého-tím je šetřeno v nákladech na energii, není za potřeby nové energie k ohřátí páry.

V rámci kontroly kvality se tvarovky pak náhodně vybírají, měří a testují na pevnost. Poslední fází je balení do folií a příprava na expedici.

Přednostmi vápenopískových tvarovek jsou výborné akustické a tepelně akumulární vlastnosti, vysoká pevnost v tlaku i u malých šířek a přesnost rozměrů tvarovky. Vápenopískové tvarovky dosahují objemové hmotnosti až $2000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a pevnosti až $40 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Těmito vlastnostem se konkurence nemůže rovnat, ale s rostoucí objemovou hmotností roste i pracnost na stavbách a také náklady za dopravu materiálu. Tepelně akumulární jsou výraznou výhodou vápenopískových tvarovek oproti konkurenci na trhu.

Nevýhodou vápenopískových tvarovek jsou tepelně-izolační vlastnosti, které zaostávají oproti konkurenci, proto musí být dodatečně opatřeny tepelnou izolací, čímž se zvyšují náklady na stavbu, šířka zdiva a také se narušuje materiálová komplexnost zdiva. [10]

Významní výrobci jsou KM Beta vyrábí tvarovky a prodává pod obchodním názvem **Sendwix** a Zapf Daigfuss v Německu pod obchodním názvem **Kalksandstein**.

4.3 Betonové tvárnice s hutným nebo pórovitým kamenivem

Specifikace betonových tvárnic s hutným anebo pórovitým kamenivem řeší norma ČSN EN 771-3.

Lehké betony se začaly používat již v roce 3 000 př.n.l., kdy byl využíván již lehký beton jako stavební materiál s kamenivem sopečného původu pro stavbu měst. Později začaly lehký beton používat Římané na stavbu akvaduktů s přírodním kamenivem zvaným pemza. Tento materiál se využívá ve stavebnictví dodnes.

Význačným vynálezem bylo v roce 1918 první umělé lehké kamenivo Haydite, vyráběno technologií expandace břidlic. V USA se vyrábí dodnes. Později bylo vynalezeno lehké kamenivo na bázi expandovaného jílu, vyráběno ve velkém v Dánsku pod názvem Leca, v Československu vznikly 2 firmy v Bratislavě a Vintířově.

Lehké kamenivo slouží jako nepřímé vylehčení zdícího prvku, kdy je pórovité kamenivo obaleno cementovým tmelem. Ve srovnání s pórobetonovými tvárnicemi jsou pevnější a technologie je mnohem snazší. Na druhé straně vznikají v nich tepelné mosty a vykazují rozdílné vlastnosti ve hmotě způsobené nehomogenní strukturou. Objemová hmotnost zrna lehkého kameniva musí být dle normy menší než $1\,800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Tyto betony mají široké spektrum pevností a objemových hmotností, díky čemuž mohou být použity jak pro funkci tepelně-izolační tak i pro aplikaci konstrukčního betonu.

Tyto betony s nízkou objemovou hmotností snižují náklady na celou stavbu, přeprava a manipulace s materiálem jsou jednodušší. Jejich výroba nezatěžuje životní prostředí, většina z nich pochází z recyklátů.

Suroviny pro výrobu lehkého kameniva mohou být buď anorganického původu, a to buď přírodní anebo umělé a organického původu. [11]

Technologie výroby umělého kameniva užívá nejčastěji tepelné zpracování, přírodních materiálů např. perlit, vermikulit, jíl a břidlice; průmyslových produktů např. sklo nebo průmyslových vedlejších produktů např. popílek, struska.

Nejpoužívanějším lehkým kamenivem pro výrobu betonových tvárnic je keramzit. Tvárnice s lehkým kamenivem na bázi keramzitu se vyrábějí z hutného nebo mezerovitého lehkého betonu. Lehký hutný beton by měl obsahovat 550 až 600 litrů malty v 1 m³ betonu. Jako součást malty se bere cement, kamenivo s velikostí zrna do 4 mm, voda a vzduchové póry. U mezerovitých betonů se je potřeba tolik malty, aby dostatečně obalila zrna kameniva a zajistila soudržnost mezi zrny. Tato malta musí obsahovat nejméně 170 litrů malty se zrnem kameniva do 0,125 mm. Důležité je keramzit, před použitím do betonové směsi navlhčit, tak aby nenasákal vodu potřebnou k hydrataci cementu, zhoršovala by se zpracovatelnost betonu. Keramzit se kvůli složitému zjišťování vlhkosti dávkuje objemově, hmotnostní dávkování by ovlivnilo vodní součinitel. Lehký beton s keramzitem má tendenci se rozměšovat, protože keramzit váží méně jako voda.

Tvarovky se vyrábějí technologií vibrolisu, kdy pomocí vibrací a tlaku dostávají požadovanou formu. Tvarovky mohou obsahovat vzduchové otvory nebo otvory s polystyrénovou výplní pro zvýšení tepelně-izolačních vlastností. [12] [20]

4.4 Pórobetonové tvárnice

Specifikace pórobetonových zdicích prvků je uvedena v ČSN EN 771-4. Pórobeton byl vynalezen v roce 1924 Švédem doktorem Eriksonem. Surovinami pro jeho výrobu jsou maltoviny (vápno/cement), křemičité složky (písek, popílek), plynotvorné látky (hliník) a pomocné látky, které např. stabilizují strukturu, urychlují tuhnutí anebo k zalkalizování směsi. Vápno se používá měkce pálené, bílé a je základní složkou pro vytvrzení v autoklávu, zároveň zabraňuje sedimentaci křemičitých látek. Cementem se koriguje výsledná pevnost výrobků a během autokládování vznikají jiné minerály než u klasického zrání cementu.

U výroby pórobetonu je používán portlandský rychlý cement (CEM I 42,5 R/52,5 R). Křemičitý písek slouží jako hlavní nositel sklovité fáze SiO_2 . Náhradou křemičitého písku může být elektrárenský popílek. Jako pěnotvorná látka slouží hliníkový prášek, který nabývá hodnot měrného povrchu $700\text{--}1200 \text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$. Hliníkový prášek reaguje s alkalickým hydroxidem vápenatým, vznikne vápeno-hlinitanový hexahydrát a plyný vodík, který vytváří dutiny v pórobetonu.

Obecně prvním krokem technologického postupu je pomletí křemičité složky a smíchání se složkou maltovinou. Takto vzniklá surovinová směs se po přidání plynotvorných látek a pomocných látek rozmísí v míchačkách na tekutou kaši, která se pak lije do forem a nechá nakypřit a ztvrdnout. Poté se zatuhlá směs nařeže a v autoklávu vytvrdí. Autoklávování probíhá v prostředí nasycených vodních par za teploty $170\text{--}190 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku páry $0,8\text{--}1,2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.

Hlavní výhodou pórobetonových tvárnic je jejich snadná manipulace a také snadné dotvarování prvků na požadovanou velikost, tím se značně snižuje doba výstavby. Další výhodou je jejich tvarová přesnost a rovinnost zvláště pak na lícové ploše na kterou se pokládá omítka. Díky rovinnosti tvarovek se může použít tenkovrstvá omítka, která se nedá použít u konkurenčních tvarovek. Rozměrová přesnost tvárnic umožňuje použití tenkovrstvých malt, to zrychluje výstavbu a šetří náklady za dopravu a přípravu malty.

Pórobetonové tvárnice se využívají na výstavbu téměř celých budov. Z pórobetu se vyrábí tvarovky pro nosné i nenosné zdivo, jednovrstvé tepelně-izolační zdivo, které již není třeba dodatečně zateplovat, překlady, schody, stropní konstrukce, dokonce i systémové komíny nebo také jako ztracené bednění. [15]

Hlavními distributory pórobetonových tvárnic jsou firmy: Xella, výrobek se prodává pod názvem **Ytong** a Hebel obchodní název výrobku je **Hebel**.

5 LEHKÉ BETONY

Lehkými betony se zabývá norma ČSN EN 206-1, která definuje objemovou hmotnost těchto betonů v rozmezí $800\text{--}2000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Lehké betony dělíme dle účelu použití na:

- Tepelně-izolační betony – tyto betony mají za úkol zvyšovat tepelnou ochranu budov a hlavní důraz je kladen na co nejnižší součinitel tepelné vodivosti
- Lehké konstrukční betony – tyto betony musí splňovat požadavky na pevnost v tlaku, aby mohli být nosnými prvky zděných konstrukcí [16]

Lehké betony dělíme také dle způsobu vylehčení na:

- Mezerovité
- Nepřímo lehčené
- Přímou lehčené

5.1 Mezerovitý lehký beton

Nahrazením hutného kameniva kamenivem pórovitým vzniká mezerovitý lehký beton. Mezerovitý beton můžeme dosáhnout i snížením množství cementového tmele, tak aby se zrna kameniva spojovaly pouze v místě dotyku anebo záměrným vynecháním frakce kameniva, většinou střední frakce 4–8 mm. Díky mezerám jsou betony vylehčovány a tím se snižuje objemová hmotnost a zároveň zvyšují tepelně-izolační vlastnosti betonu. [12] [16]

5.2 Pojiva mezerovitého betonu

5.2.1 Cement

Cement je jemně mleté práškové hydraulické pojivo a základní složkou betonu. Po smíchání s vodou vytváří cementovou kaši, která v důsledku hydraulické reakce tuhne a tvrdne. Kromě hydraulické reakce, vznikají krystaly různých chemických reakcí mezi CaO , Al_2O_3 a SiO_2 , které mezi sebou prorůstají, jejich poměr má vliv na pevnost cementu. Jelikož se jedná o hydraulické pojivo, cement tuhne i tvrdne pod vodou, po předešlém zatuhnutí na vzduchu a zachovává si svou pevnost a stabilitu. Cement se vyrábí vypalováním vápence a jílu při teplotách $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, většinou v rotačních pecích. Vypáleny slínek se poté mele, pokud je potřeba, přidávají se k němu i příměsi (struska, popílek). Cementy mohou být jednosložkové (portlandský, vysokopecní), dvousložkové (portlandský struskový cement) a výjimečně se vyrábí vícesložkový cement, který obsahuje více než jednu hydraulickou složku). Mezi slínkové minerály patří C_3S , C_2S , C_3A a C_4AF . Poměr mezi těmito minerály udává výsledné vlastnosti cementu. Dále se mohou do cementu přidávat různé příměsi, které upravují výsledné vlastnosti a cenu cementu. Jako korekční surovina se přidává síran vápenatý, který ovlivňuje tuhnutí cementu. [17] [18]

Cementy se dělí pěti skupin dle ČSN EN 197-1.

Druhy cementu

CEM I – portlandský cement

CEM II – portlandský cement směsný

CEM III – vysokopecní cement

CEM IV – pucolánový cement

CEM V – směsný cement

Fillery

Vhodné fillery do tenkovrstvých lepidel mohou být agregáty plniva, křemičitého písku, oblázků, vápence, křemeliny, perlitu, vermikulitu atd. Tyto materiály obsahují fillery, které jsou čisté a inertní. [17]

Pucolánové příměsi

Pucolánové příměsi jako jsou elektrárenský popílek, vulkanický popílek, mikrosilika atd. Tyto příměsi jsou látky, které zásobují lepidlo reaktivním oxidem křemičitým na podporu vápenato – křemičité hydratace. V podstatě tyto příměsi mohou ovlivnit objemovou hmotnost, tuhnutí, hydrataci a urychlit požadovanou pevnost lepidla. [18] [19]

Pigmenty

Pigmenty jako oxid železnatý a oxid titaničitý může obarvit lepidlo na požadovanou barvu. [17]

Jemně mletý vápenec

Materiál, který má široké využití ve stavebních činnostech, jako dobře dostupný přírodní zdroj. Využívá se jako filler při výrobě asfaltů a betonů nebo také k odsiřování kouřových plynů v tepelných elektrárnách. Také se velmi často používá jako plnivo do suchých omítkových a maltových směsí. [17]

Křemenný písek

Křemenný písek do cementových lepidel musí být praný a zbaven veškerých nečistot. Obsahuje cca 98 % SiO_2 a je nutné, aby měl frakci 0,063 – 1 mm. Objemová hmotnost tohoto plniva je 1750 kg/m^3 . [17]

5.3 Nepřímo lehčené betony

Nepřímo lehčené betony jsou vyrobeny z kameniva s malou objemovou hmotností, které mohou být: [16]

- Přírodní
 - Vulkanického původu (pemza, láva),
 - sedimentačního původu (tufy a tufity),
- Umělé
 - Průmyslové odpady (popílek, struska, škvára),
 - Uměle vyrobené kamenivo (keramzit, perlit).

6 DRUHY LEHKÉHO KAMENIVA PRO VÝROBU NEPŘÍMO LEHČENÝCH BETONŮ

6.1 Keramzit

Keramzit vzniká expandováním jílové zeminy za vysokých teplot 1100-1200 °C. Hlína se nadýmá v pyroplastickém stavu. U nadýmání je nutné dosáhnout takové taveniny, aby se na povrchu slila a stekla a uvnitř byla konzistence taková, že nebudou unikat vzniklé plyny. Chemické složení hlíny by mělo obsahovat hlavně taviva v podobě oxidů železa Fe_xO_y a dále oxid vápenatý CaO a kationty draslíku K^+ a sodíku Na^+ . Pro uvolnění v plynu je potřeba, aby tavenina obsahovala látku, která provede expandování. Touto látkou je uhlík C. Během expanze keramzitu vznikají uzavřené dutinky plynu, zvyšující tepelně-izolační vlastnosti a způsobující ztrátu hmotnosti.

Principem expanze keramzitu jsou oxidačně-redukční děje, kdy oxidy železa figurují jako oxidovadlo a uhlík jako redukovadlo.

Sypná hmotnost zrna keramzitu je v rozmezí $300\text{--}800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a kameniva, odolnost proti drcení $0,6\text{--}4\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ v závislosti na frakci zrn kameniva, nasákavost je $10\text{--}15\%$. [14]

Výroba keramzitu probíhá tak, že se surovina natěží a dopraví do výroby, odtud se dále pomocí skipů dostává do kolových mlýnů, kde je pomleta. Na talířových mísidlech se smísí s expandačními látkami a směs se znovu pomele na jemnější částice, která je pak převezena dopravníky na sklad surovin. Korečkovým rypadlem se uleželá směs tlačí šnekovým cihlářským lisem a poté je provedeno ořezávání hmoty na válečky požadované frakce., tyto jsou dále zakulacovány na rotačním bubnu. Dopravníky se přesunou do rotační pece, kde probíhá výpal a expandace válečků a následně dochází k chlazení kameniva a rozdělení do zásobníků podle frakcí. [14] [20]

Keramzit se používá hlavně pro zasypy stropů, kde je volně ložený anebo střech, zde plní tepelně-izolační funkci. Je vstupním materiálem pro výrobu zdicích prvků a panelů z lehkého betonu. Dalšími možnostmi použití keramzitu jsou zapracování do žárobetonu, do krbů a protihlukových stěn.

Jediným výrobcem v Čechách je firma Lias Vintířov, výrobek se prodává pod názvem **Liapor**. [20]



Obrázek 2: Lehké kamenivo z keramzitu frakce 4-16 [21]

6.2 Lehké kamenivo z perlitu

Perlit je někdy označován též jako experlit, jelikož perlit je i hornina, ze které se perlit vyrábí. Jedná se o vulkanické sklo, které ve svém jádru obsahuje zatuhlou vodu různých modifikací (magmatická, adsorbovaná, zeolitická). Během výpalu se voda mění na páru a tím perlit zvětšuje objem až 14krát. Objemová hmotnost zrna perlitu je $70\text{--}350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, pevnost $0,6\text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a nasákavost dosahuje hodnot až 300 %. Protože je perlit silně hydrofobní, nenamáčí se do vody před zamícháním do betonu. [14]

Výroba perlitu probíhá následovně. Ze zásobníků putuje perlit do trubky, kde je vháněn plyn pomocí ventilátoru, pak putují spolu do fontánové pece, kde probíhá dvoustupňový výpal. První výpal dosahuje teplot $350\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy dochází k předehtání perlitu a uniká nejslaběji vázaná voda. Během druhého výpalu za teplot $1100\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází k vlastní expanzi perlitu přetlakem vodních par. Expandovaný perlit se třídí a uchovává v silech. Spálené kouřové plyny z výpalu jsou očištěny od spalin a jemných podílů expandovaného perlitu a opět použity.

Perlit se používá v ČR u tepelně-izolačních omítek anebo jako volně sypané kamenivo a dále se z něj vyrábí perlitové tvarovky – obchodní název **Peril**, výrobce firma Peril. [14] [22]

6.3 Lehké kamenivo z expandovaného obsidiánu

Expandovaný obsidián je pórovité kamenivo s uzavřenými póry o velikosti $0,03\text{--}2\text{ mm}$. Toto kamenivo se vyrábí ve tvaru pelet, čímž jsou odolnější vůči tlaku během procesu míchání. Díky uzavřené pórovitosti neabsorbuje vodu, a je možné vypočítat přesný poměr vody a cementu, abychom dosáhli požadovaných vlastností. Struktura peletové buňky umožňuje rychlejší přenos vlhkosti a tím rychlejší schnutí materiálu.

Expandovaný obsidián vyniká nízkou objemovou hmotností zrna od $80\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, vykazuje třídu požární odolnosti A1 a dokáže odolávat teplotám až $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Expandovaný obsidián se vyrábí v zařízení, kde se transformuje rozdrčený křemíkový písek vulkanického původu za vlivu vysokých teplot $1200\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy

se vytvoří uzavřená zrníčka s pórem vyplněným vzduchem, který následně působí jako tepelný izolant. Z 1 m³ křemíkového písku dokážeme vytvořit 12-15 m³ expandovaného obsidiánu. Výroba je ekologická, vypouští do atmosféry jen vodní páru. Obchodní název je **Thermosilit** vyráběn firmou Kalkwerk Dullinger. [23]

6.4 Lehké kamenivo z pěnového skla

Pěnové sklo je pórovitý a vícefázový materiál, který obsahuje, jak plynnou, tak pevnou fázi. Pevnou fázi tvoří sklo, uzavírající jednotlivé póry, které jsou několik mikrometrů tlusté. Tyto póry jsou vyplněny plynnou fází. Materiál disponuje unikátní kombinací fyzikálních vlastností, jako jeho nízká objemová hmotnost, tuhost, mrazuvzdornost, odolností vůči požáru, je tepelně i zvukově izolační, chemicky inertní a netoxický, odolný vůči škůdcům a bakteriím. Také je odolný vůči vodě a vodním parám. Všechny tyto vlastnosti mají vliv na jeho unikátnost nejen v industriálním poli, ale také na poli stavebním, jakožto konstrukčního materiálu. V závislosti na účelu konstrukce – tepelně-izolační nebo zvukově izolační, může mít pěnové sklo jednotlivě uzavřené póry případně síť mezipórových kanálků. Jelikož je v tepelně-izolačních vlastnostech pěnové sklo kvalitnější, než tepelné izolace ze skelné vaty nebo vaty minerální, je o něj větší zájem pro jeho tepelně-izolační vlastnosti než pro vlastnosti zvukově izolační. Mimo toto použití, se dá pěnové sklo využít, jako katalyzátor u plynné nebo kapalně filtrace kovů, membrána při spalovacích technologiích, jako nositel imobilních mikroorganismů při léčebných zákrocích. Využití pěnového skla záleží na typu a hustotě pórů.

Většina lehkého kameniva na bázi pěnového skla se vyrábí smícháním slinutého skelného prášku a napěňovacích přísad. Napěňovací přísady vypouštějí plyn do pyroplastické hmoty, skládající se ze změkčené skelné maticové struktury. [24] [25]



Obrázek 3: Frakce pěnového skla [27]

6.4.1 Výroba lehkého kameniva z pěnového skla

Výroba pěnového skla se provést dvěma technologiemi:

První technologii využívají například firmy Aglass a Refaglass. V prvopočátku výroby pěnového skla, je recyklace skelného odpadu. Primárním záměrem je znovu využití recyklovaného skla ve sklárnách a pěnové sklo se vyrábí jen z recyklátu, který k tomuto účelu není možné použít. Sklo se získává od různých dodavatelů, ale hlavně od zpracovatelů odpadu. Sklo, putuje do zásobníků, ze kterých putuje ve formě střepů různých velikostí do prostoru, kde je zbaven nežádoucích odpadů. Střepy pro sklářské účely musí splňovat určitou velikost, a rozměrům nevyhovující drobné kusy skla, které by jinak leželi na skládce, jsou používány na výrobu pěnového skla. Prvním krokem je rozdrcení střepů na moučku o velikosti cca 90 mikrometrů. Moučka má bílou až bílo šedou barvu, a to bez ohledu na barvu vstupního skla. Barva je dána obecným chemickým složením a zrnitostí skla, tedy SiO_2 v amorfním stavu. K moučce se v určitém poměru přidají napěňovací přísady, většinou glycerin.

Výsledná směs je poté nasypána na rouno z takového materiálu, aby se na něj nepřilepila či nepřipálila a prochází pecí, kde je teplota mezi 800–900 °C. Moučka o hmotnosti 100 kg se promění v peci na pěnové sklo během cca 50 minut. Vše je ovlivněno jednak kvalitou moučky, jednak teplotou v peci a také typem napěňovací přísady. Vlivem teplotního šoku, kdy materiál vyjede z horké pece cca 900 °C do místnosti o teplotě 20 °C, se produkt rovnou rozpadne na frakci 32-63 mm, která je už vhodná k distribuci. Menší frakce je dodatečně dodrcena. Materiál se poté uskládňuje a dále distribuuje k zákazníkovi, buď volně ložený anebo v bigbazích. Množství pěnového skla se udává v objemových jednotkách, rozsah objemové hmotnosti zrna pěnového skla mezi 140–160 kg·m⁻³. Pro výrobu pěnového skla je výhodný nepřetržitý provoz – náklady na zahřev pece jsou velmi vysoké a zastavení výroby a znovu náběh výroby neekonomické. Navíc zásob vstupního materiálu, tedy recyklovaného skla je mnoho a poptávka pěnového skla je dostatečná. Takže k zastavení výroby nedochází. [25] [26]

Firmy Poraver a Liaver využívají jiné technologie. U této se také využívá recyklát pěnového skla, který se pomele a podrtí na velikost 0,035 mm. K recyklátu se přidávají pojiva a expandační činidla a aglomerační technologií se vytvoří sbalky, které mají vlhkost menší než 2 %. Poté probíhá výpal za teploty 850 °C, dochází k expandaci plynu a vytvoření pórů. Výsledný produkt má kuličkový tvar, vysokou pevnost v tlaku, oproti konkurenci v rozmezí 1,4 – 3 N·mm⁻² a objemovou hmotnost zrna mezi 150–450 kg·m⁻³, s ohledem na frakci kameniva. Velikost zrn je mezi 0,1 až 40 mm. Kuličkový tvar zrn má vliv na lepší zpracovatelnost betonu a lepší čerpatelnost. Má nízkou nasákavost, a proto u výroby betonu anebo malt není problém s konzistencí kvůli nadbytečné vodě. Lehké kamenivo vyrobeno touto technologií má vysokou pevnost v tlaku, avšak jeho povrchová pevnost je nízká. Tato vlastnost je výhodná během alkalicko-křemičité reakce, kdy se chce hydrát křemičitanu sodného ve formě gelu rozpínat ve směru s nejnižším odporem, což bývá většinou cementový tmel, kde narušuje jeho matici a tím je beton náchylnější na vlivy prostředí. Díky nízké povrchové pevnosti, však gel propíchne povrch kameniva, vstoupí do něj a za nějaký čas s ním splyne, a tím nezpůsobuje narušení cementové matrice a degradaci betonu.

Ze stejného důvodu je kamenivo používáno ke zlepšení mrazuvzdornosti betonu, jelikož voda, která vlivem mrazu zvětšuje svůj objem, se nerozpíná do cementové matrice ale opět do zrn kameniva. [28]



Obrázek 4: Lehké kamenivo na bázi pěnového skla technologií firmy Liaver [29]

6.4.2 Využití lehkého kameniva na bázi pěnového skla

Lehké kamenivo na bázi pěnového skla se využívá jako podsyp pod základovou desku, kde zvyšuje tepelně – izolační vlastnosti základu a zamezuje odchodu tepla do země. Oproti klasickým podsypům tak snižuje nutnou hloubku základů, a tím snižuje náklady pro výkop. Nízká objemová hmotnost pěnového skla a snadné zhutnění, umožňují lehčí manipulaci na stavbě a rychlejší výstavbu. Podsyp z pěnového skla rovnou slouží i jako drenážní vrstva.

Ke snížení tepelných ztrát ze stěn bazénu se využívá obsyp z pěnového skla, které zajišťuje lepší akumulaci tepla a zároveň je nedeformuje. To zabezpečuje vysoká odolnost v tlaku. Pěnové sklo se využívá i u výroby lehkých betonů a mezerovitých lehkých betonů. Lehký mezerovitý beton s pěnovým sklem se používá, jako tepelně-izolační vrstva pod hrubé podlahy, kde nahrazuje podkladní beton a snižuje hmotnost podlahy.

Ve stavbách s klenbovými stropy, se využívá zásyp pěnovým sklem, jelikož ostatní materiály jako polystyren nebo minerální vata, nejsou schopny vytvořit plynulý přechod mezi obloukem a rovinnou podlahou nad klenbou. Vlivem dobré tepelně-izolačních vlastností a vlhkostní neprodyšnosti je vhodné používat pěnové sklo k zateplení vinných sklípků, které obvykle mají klenbové stropy.

Násypy z lehkého kameniva na bázi pěnového skla se využívají i při izolaci podlah, kdy pěnové sklo zajišťuje přirozené odvětrávání v prostoru pod podlahou, zároveň zamezuje pronikání vlhkosti směrem k podlaze a tím zabraňuje tvorbě plísní. Vedle tepelně-izolačních vlastností a tím úspore energie při vytápění, je pěnové sklo odolné vůči škůdcům a hlodavcům, proti kterým konkurenční materiály například z minerální vlny odolní nejsou. [25] [28]

II PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍL PRÁCE

Bakalářská práce se bude zabývat možnostmi využití lehkého kameniva na bázi pěnového skla pro výrobu zdicích tvarovek. Cílem je především provedení literární rešerše a posouzení možnosti uplatnění lehkého betonu z kameniva na bázi pěnového skla při výrobě pokročilých zdicích tvarovek. Dále pak vypracování teoretického návrhu zdicí tvarovky s ohledem na klíčové oblasti potencionálního uplatnění těchto výrobků ve stavební praxi. V neposlední řadě pak bude cílem práce navrhnout vhodnou recepturu lehkého betonu pro výrobu navržených zdicích tvarovek a provedení ověření vlastností betonu i tvarovky pomocí praktických experimentů.

8 METODIKA PRÁCE

Nejdříve byla provedena literární rešerše, ze které jsme čerpali důležité informace. Dále byl proveden průzkum trhu a byli určeny pevnostní a tepelně-izolační vlastnosti, které musí tvarovka splňovat. Při návrhu lehkého mezerovitého betonu, byli navrženy receptury, které byly odvozeny na základě předchozích prací provedených na VUT v Brně. Pevnost v tlaku a součinitel tepelné vodivosti byli použity ke zvolení optimálního tvarového uspořádání tvarovky, tak aby splňovala stanovené vlastnosti, a k odvození výsledných vlastností zdicího prvku z tabulky v příloze B z normy ČSN EN 1745. Po zvolení vhodného tvarového uspořádání bylo potřeba najít nejvhodnější recepturu pro vibrolisovanou výrobu tvarovky. Byly vytvořeny tři receptury a z každé receptury byly vyrobeny následné zkušební vzorky:

Aby bylo dosaženo kvalitních vzorků, dbalo se na správné hutnění a vyplnění celé plochy formy. K tomu byl použit vibrační stůl v kombinaci s tlakem vyvozeným navlhčenou kovovou deskou. Rovnoměrný rovný povrch je základním požadavkem k přesnému zaměření pevnosti v tlaku a stanovení součinitele tepelné vodivosti. U všech směsí bylo provedeno zkoušení čerstvého betonu k zjištění objemové hmotnosti.

Byly použity ocelové formy, z důvodu jejich snadné rozebíratelnosti. Na základě zkušeností a prostudování předešlých bakalářských prací byla určena potřebná dávka cementu na obalení kameniva a poté zvolena jedna receptura s menší dávkou cementu a jedna receptura s větší dávkou cementu pro srovnání s navrhovanou recepturou.

Vzorky byly odformovány po sedmi dnech. Zkoušky objemové hmotnosti ztvrdlého betonu, pevnosti v tlaku a stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou desky – měřidlem tepelného toku, byly provedeny 28 dní od namíchání směsi.

8.1 Návrh tvarovky z mezerovitého betonu na bázi pěnového skla

Na základě požadavků trhu byly určeny vlastnosti $f_c \geq 2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a $\lambda_{10,dry,unit} \leq 0,1 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$, které navržená tvarovka musí splňovat. Dále bylo zvoleno takové tvarové uspořádání prvku, aby ji bylo možné vyrobit. Jako reference byl vybrán konkurenční výrobek s tvarovým uspořádáním - Liatherm 365, protože byl nejvíce podobný svými vlastnostmi cílovým hodnotám navrhovaného budoucího výrobku (tvarovky). Jeho materiálové složení se však liší a neodpovídá hodnotám součinitele tepelné vodivosti od materiálu zamyšleného k použití pro navrhovanou tvarovku. Podle těchto cílových hodnot byl poté v normě ČSN EN 1745: zdivo a výrobky pro zdivo – metody stanovení tepelných vlastností, zvolen vzor zdicího prvku, který se jím více přibližoval, než zvolený Liatherm 365. Jediný typ tvarovky, který vyhovoval výše zmíněným parametrům byl typ B.35. Dle tabulky B.35 – Tvárnice z betonu s pórovitým kamenivem – Tvar a geometrické uspořádání 1,7/x, ze které bylo určeno, že tvarovka by měla mít $\lambda_{10,dry,unit} = 0,092 \text{ [W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$. Tento postup popisoval přibližné výsledné požadované vlastnosti tvarovky, která byla odvozena na základě předchozích prací prováděných na VUT v Brně. Jelikož byla zhotovena směs jiné receptury, než byla vybrána, museli být výsledné vlastnosti tvarovky dopočítány zpětně.

8.2 Návrh vstupních surovin

Materiály na výrobu těchto receptur byly zvoleny – cement 42,5 R z Mokré, jako pojivo a nositel pevnosti, lehké kamenivo na bázi pěnového skla Refaglass frakce 4-16 mm, které zajistí požadovanou mezerovitost betonu a tím tepelně-izolační vlastnosti, expandovaný obsidián jako zástupce nízké frakce, kterého úkolem je zabránění sedimentaci a shlukování cementu, voda a plastifikátor MURAPLAST FK 19, které budou následně rozvedeny.

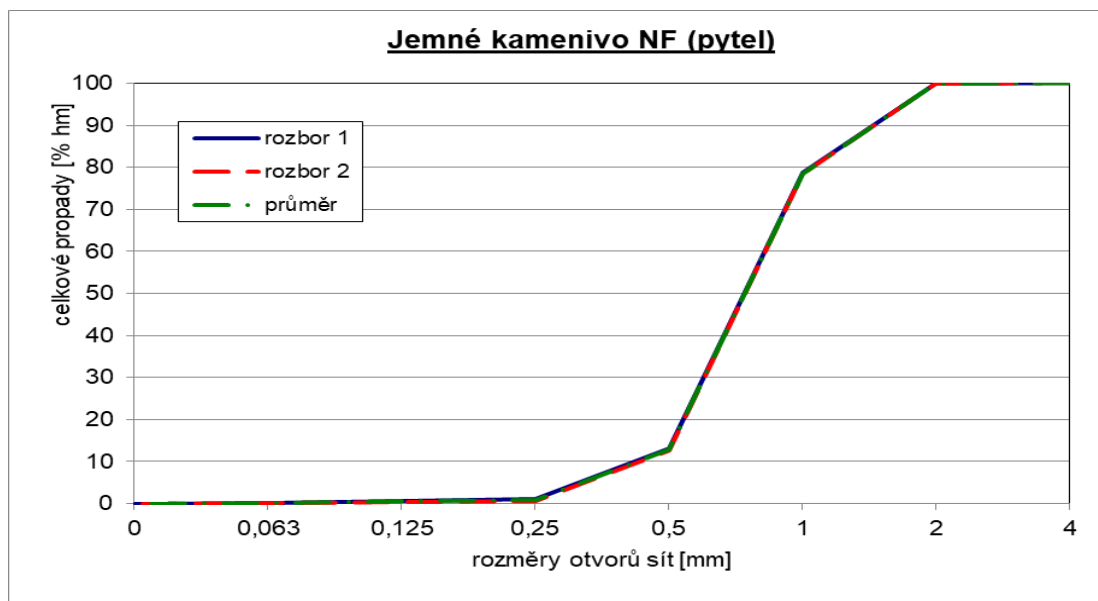
8.2.1 MURAPLAST FK 19

Slouží ke snížení vodního součinitele čerstvého betonu. Zároveň mírně zpomaluje tuhnutí směsi a zvyšuje homogenitu výsledného vzorku. Jedná se o superplastifikační přísadu, která se přidává do betonu po přidání záměsové vody anebo zároveň s ní.

8.2.2 Expandovaný obsidián Thermosilit

Thermosilit je bílé lehké drobné kamenivo frakce 0-4 mm z křemičitého písku vulkanického původu, které je vyráběno ekologickou výrobou. Slouží jako drobná frakce kameniva v betonu, která zabraňuje sedimentaci cementu a dává se se objemově.

Graf 1: Sítový rozbor Thermosilitu



8.2.3 Lehké kamenivo z pěnového skla REFAGLASS

Lehké kamenivo šedé barvy vyráběno z recyklátu skla. Frakce použitého kameniva je 4-16 mm. Pěnové sklo má dobré pevnosti a poměrně dobré tepelně-izolační vlastnosti. Využívá se jako plnivo v lehkých betonech. Dávkuje se do míchačky objemově.



Obrázek 5: Pěnové sklo dávkováno objemově do míchačky

8.3 Zkušební receptury

Jako první byla určena vhodná dávka cementu v množství 380 kg na 1 m³ betonu. Optickým pozorováním při vibraci a plnění forem bylo zjištěno, že dané množství cementu v kombinaci s expandovaným obsidiánem způsobuje nadbytek cementového tmele v čerstvém betonu, a proto bylo množství cementu sníženo na 200 kg na 1 m³ betonu. I u této receptury se zdál nadbytek cementového tmele velký, a proto bylo opět množství cementu sníženo na 150 kg na 1 m³ betonu. Výsledné receptury jsou uvedeny v tabulkách.

Tabulka 1: Receptury na 1 m³ betonu:

Vstupní složky			Receptura		
			1	2	3
			1 m ³		
Cement 42,5 R Mokrý		[kg]	380	200	150
Kamenivo	4-16 mm REFAGLASS	[l]	750	750	750
	Expandovaný Obsidián	[l]	250	250	250
Voda		[l]	175	115	86
Plastifikační přísada MURAPLAST FK 19		0,8 % z m _c [kg]	3	1,6	1,2
Vodní součinitel		[-]	0,46	0,58	0,58

Tabulka 2: Receptury na 40 l betonu:

Vstupní složky			Receptura		
			1	2	3
			40 l		
Cement 42,5 R Mokrý		[kg]	15,2	8	6
Kamenivo	4-16 mm REFAGLASS	[l]	30	30	30
	Expandovaný Obsidián	[l]	10	10	10
Voda		[l]	7	4,6	3,45
Plastifikační přísada MURAPLAST FK 19		0,8 % z m _c [g]	122	64	48
Vodní součinitel		[-]	0,46	0,58	0,58

8.4 Zkušební vzorky

Při vytváření čerstvého betonu bylo nejprve dávkováno lehké kamenivo na bázi pěnového skla a expandovaného obsidiánu. Poté byl přidán cement a po promíchání suchých složek přidávána voda. Voda byla dávkována na základě vizuálního hodnocení zpracovatelnosti směsi. Během míchání surovin v míchačce byly detailně pozorovány změny konzistence čerstvého betonu, tak aby bylo kamenivo zcela obaleno cementovým tmelem. Následně byly plněny formy ve dvou vrstvách, přičemž každá vrstva byla zvibrována na vibračním stole a kovovou deskou byl vyvozen požadovaný přítlak. Byly vytvořeny 3 krychle z každé receptury, které zrály v klimatizační komoře a po 28 dnech byly na nich provedeny zkoušky mechanických vlastností – pevnost v tlaku a objemová hmotnost v ztuhlém stavu.

Součinitel tepelné vodivosti se stanovil na zkušebních vzorcích v podobě desek, přičemž byly vytvořeny 2 desky z každé receptury.

krychle o hraně 150 mm - 3 vzorky

desky o rozměrech 300 x 300 x 60 mm - 2 vzorky

8.5 Zkoušky na čerstvém betonu

8.5.1 Stanovení objemové hmotnosti v čerstvém stavu

Objemová hmotnost v čerstvém stavu se stanovuje dle ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu – část 6: Objemová hmotnost.

Pomůcky: nádoba (vodotěsná, tuhá, kovová, horní okraj a dno rovnoběžné, nejmenší rozměr $\geq 4 \cdot d_{max}$, minimálně ale 150 mm, minimální objem 5 l), plnicí nástavec, stupňovací zařízení: vibrační stůl, váhy s přesností 0,1 % hmotnosti betonu, srovnávací pravítko (ocelové minimálně o 100 mm delší, než je největší vnitřní rozměr nádoby), lopatka, 2 zednické lžíce, nádoba na promíchání, lopata a palička.

Postup: prázdnou nádobu jsme zvážili, naplnili vodou, následně jsme ji zvážili znovu a na základě těchto hmotností jsme spočítali objem vody. Poté jsme nádobu naplnili čerstvým betonem a zhutnili na vibračním stole. Zbavili jsme se přebytečného betonu a nádobu s betonem jsme opět zvážili a stanovili tak jeho objemovou hmotnost. [30]

8.6 Zkoušky na ztvrdlém betonu

8.6.1 Stanovení objemové hmotnosti na ztvrdlém betonu

Stanovení objemové hmotnosti ve ztvrdlém stavu se zkouší dle ČSN EN 12390-7: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

Pomůcky:

Posuvné měřítko, pravítko, váhy, nádoba s vodou/sušárna

Postup:

Tělesa jsme zvážili s přesností 0,01 % a změřili jejich rozměry v mm s přesností na dvě desetinná místa. Z naměřených hodnot jsme vypočítali jejich průměrný objem a z něj objemovou hmotnost. [31]

Objemová hmotnost se vypočítá dle vzorce:

$$D = \frac{m}{b \cdot l \cdot h} [kg \cdot m^{-3}]$$

kde:

D_{ZB} – objemová hmotnost ztvrdlého betonu [$kg \cdot m^{-3}$]

m – hmotnost zkušební tělesa [kg]

b, l, h – rozměry zkušebních těles [mm]

8.6.2 Stanovení pevnosti v tlaku

Stanovení pevnosti v tlaku se provádí dle ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Pomůcky:

Zkušební lis, spároměrky, úhelník, posuvné měřítko

Postup:

Změřili jsme rozměry zkušebních těles s přesností na dvě desetinná místa v mm a vypočítali jsme velikost tlačené plochy. Očistili jsme povrch tlačných desek a těleso středově uložili s přesností $\pm 1 \%$. Tělesa byla ukládána do lisu kolmo na směr hutnění. Zatěžovali jsme konstantní rychlostí (0,2 – 1,0 MPa/s), plynule bez rázu do porušení tělesa. Zaznamenali jsme maximální zatížení F (N). Poté jsme vypočítali pevnost v tlaku se zaokrouhlením 0,1 N·mm⁻². [32]

Pevnost v tlaku se vypočítá dle vzorce:

$$f_c = \frac{F}{A} [MPa]$$

kde:

f_c – pevnost v tlaku [N·mm⁻²]

F – maximální síla při porušení vzorku [N]

A – tlačná plocha [mm²]



Obrázek 6: Detail porušeného vzorku po provedení zkoušky pevnosti v tlaku

8.6.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno dle ČSN EN 12667 Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku – Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu metodou desky dle ISO 8301.

Princip zkoušky:

Ve zkušebním vzorku je třeba vyvodit ustálený teplotní stav a na základě průměrných hodnot elektrického příkonu topného elementu měrné desky, účinné plochy topné desky, teploty vztažené plochy teplého povrchu vzorku, teploty vztažené plochy chladného povrchu vzorku a tloušťky vzorku, lze výpočtem určit hodnotu součinitele tepelné vodivosti vzorku. U metody měřidla tepelného toku je hodnota součinitele tepelné vodivosti vyjádřena z hustoty.

Postup zkoušení:

Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti byl použit přístroj Lambda 2300, Holometrix Micromet. Před zkoušením byly vzorky změřeny a vysušeny při 65 °C a poté při teplotě 105 °C. Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno v ustáleném stavu při střední teplotě +10 °C a teplotním spádu 10 K. Vyhodnocení bylo provedeno dle ČSN EN 12667/ISO 8301: [33]

Postup vyhodnocení:

Hustota tepelného toku q_d :

$$q_d = U \cdot k_m$$

kde:

U – průměrná hodnota napětí na obou měřidlech hustoty tepelného toku [V]

k_m – kalibrační konstanta [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

Součinitel tepelné vodivosti λ_{sam} :

$$\lambda_{sam} = \frac{U \cdot k_m \cdot d_m}{\theta_{hd} - \theta_{cd}}$$

Kde:

λ_{sam} – hodnota součinitele tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]

d_m – průměrná hodnota tloušťky zkušební vzorku [m]

θ_{hd} – výpočtová hodnota povrchové teploty teplé strany zkušební vzorku [$^{\circ}\text{C}$]

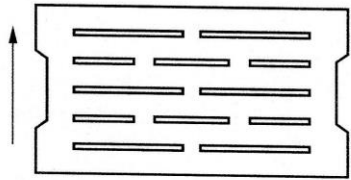
θ_{cd} – výpočtová hodnota povrchové teploty chladné strany zkušební vzorku [$^{\circ}\text{C}$]

8.7 Výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti zdicích prvků

Výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti byl proveden na základě normy ČSN EN 1745, dle přílohy B. Ekvivalentní tepelná vodivost byla stanovena na navržené tvarovce s šířkou $b = 380$ mm. Tato šířka byla zvolena kvůli snazší možnosti srovnání dosažených parametrů s konkurencí. K návrhu a výpočtu tvarovky s požadovanou ekvivalentní tepelnou vodivostí byl použit obrázek B.35 – Tvárnice z betonu s pórovitým kamenivem – Tvar geometrického uspořádání 1,7/x a tabulka B.35

ČSN EN 1745

Tabulka B.35 – Tvárnice z betonu s pórovitým kamenivem – Tvar a geometrické uspořádání 1,7/x



$\lambda_{10,dry,mat}$ [W/(m·K)] prvku	$\lambda_{10,dry,unit}$ [W/(m·K)] prvku	R [m ² ·K/W] na 100 mm tloušťky / $\lambda_{10,dry,mas}$ zdíva [W/(m·K)] s maltou o tepelné vodivosti [W/m·K]		
		0,16	0,32	0,80
0,10	0,062	1,01/ 0,10	0,92/ 0,11	0,78/ 0,13
0,17	0,092	0,69/ 0,14	0,64/ 0,16	0,55/ 0,18
0,25	0,120	0,52/ 0,19	0,49/ 0,20	0,43/ 0,23
0,40	0,160	0,37/ 0,27	0,36/ 0,28	0,32/ 0,31
0,55	0,195	0,30/ 0,33	0,29/ 0,34	0,26/ 0,38

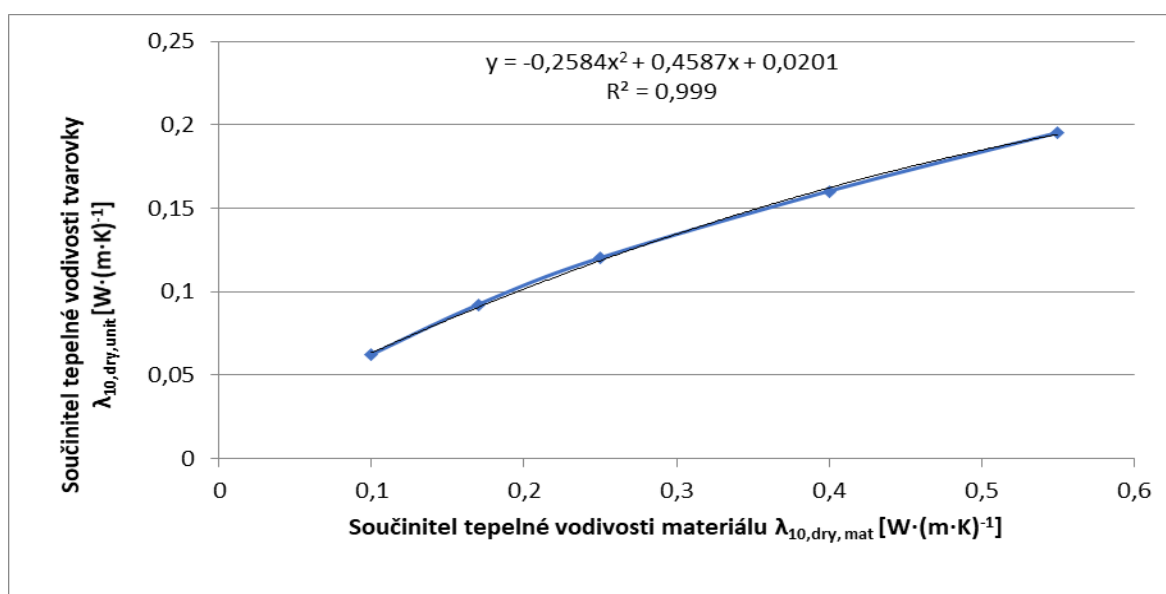
Obrázek B.35 – Tvárnice z betonu s pórovitým kamenivem – Tvar a geometrické uspořádání 1,7/x

(poměrná souhrnná tloušťka příčných žebér: 20,6 %; podíl otvorů: 11,8 %)
základní rozměry: $l = 495$ mm, $w = 300$ mm, $h_{unit} = 238$ mm, $h_{mor} = 12$ mm

Obrázek 7: Tvarové uspořádání a tabulka využití u návrhu tvarovky [3]

Z této tabulky byly dány do závislosti součinitel prostupu tepla materiálu a součinitel prostupu tepla tvarovky. Na základě této závislosti byl vytvořen graf, ze kterého byla definována rovnice pro výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti tvarovky. Poté byly dosazeny hodnoty ze zkoušek stanovení součinitele tepelné vodivosti jednotlivých receptur materiálu do rovnice a byly zjištěny hodnoty ekvivalentní tepelné vodivosti zdícího prvku.

Graf 2: Závislost součinitele tepelné vodivosti tvarovky na součiniteli tepelné vodivosti materiálu



Z tabulkových hodnot viz. tabulka B.35 Tvárnice z pórovitým kamenivem – Tvar a geometrické uspořádání 1,7/x, vznikla rovnice, která vyjadřuje závislost mezi součinitelem tepelné vodivosti tvarovky a materiálu. Rovnice je ve tvaru:

$$\lambda_{10,dry,unit} = -0,2584 \cdot \lambda_{10,dry,mat}^2 + 0,4587 \cdot \lambda_{10,dry,mat} + 0,0201$$

Dosazením hodnot ze zkoušky stavenovení součinitele tepelné vodivosti receptur materiálu byly získány výsledné hodnoty ekvivalentní tepelné vodivosti tvarovky.

Tabulka 3: Zhodnocení receptur na základě vlastností použitých při návrhu

Receptura	$\lambda_{10,dry,mat} [W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$	$\lambda_{10,dry,unit} [W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$
1	0,2541	0,1206
2	0,2088	0,1046
3	0,1554	0,0850

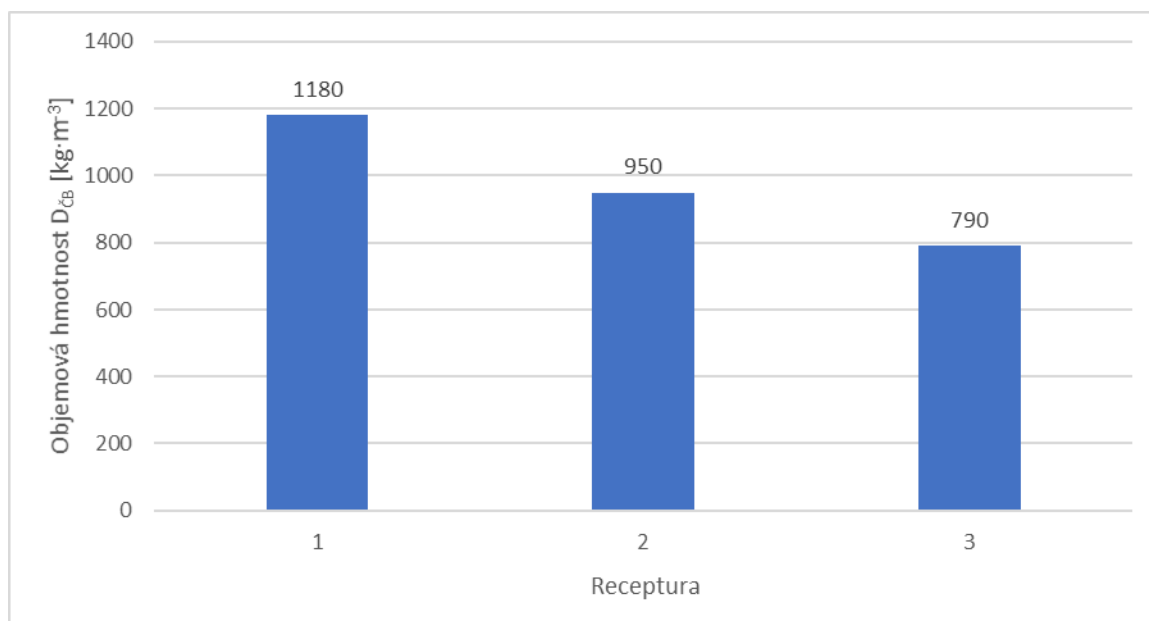
9 VYHODNOCENÍ

Na čerstvém betonu jsme provedli zkoušku objemové hmotnosti u tří navržených receptur.

Tabulka 4: Vlastnosti čerstvého lehkého betonu daných receptur

Receptura	Ozn. tělesa	Hmotnost ČB [kg]	Objemová hmotnost $D_{\text{ČB}}$ [kg·m ³]	Průměr $D_{\text{ČB}}$ kg·m ³
1	K1	4,06	1200	1180
	K2	3,91	1160	
	K3	3,86	1140	
	D1	6,44	1190	
	D2	6,46	1200	
2	K1	3,16	940	950
	K2	3,17	940	
	K3	3,20	950	
	D1	5,12	950	
	D2	5,14	950	
3	K1	2,65	790	790
	K2	2,64	780	
	K3	2,69	800	
	D1	4,26	790	
	D2	4,30	800	

Graf 3: Závislost objemové hmotnosti čerstvého lehkého betonu na recepturách



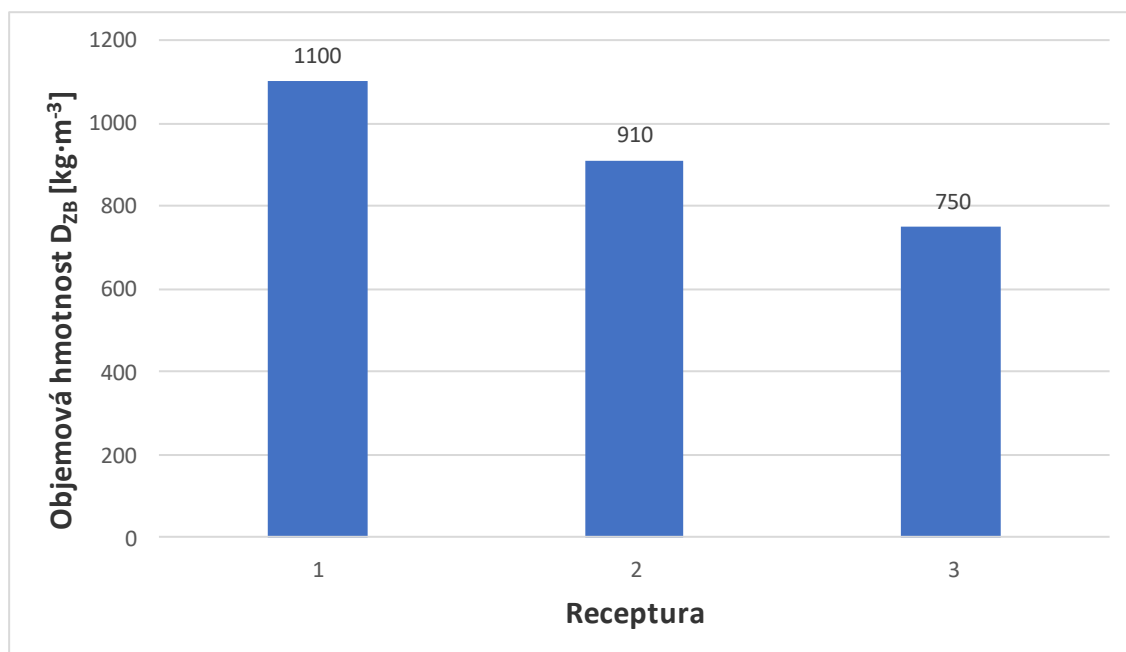
Podle očekávání s rostoucím množstvím cementu roste i objemová hmotnost lehkého mezerovitého betonu v čerstvém stavu. Jelikož lehké kamenivo se dávkovalo ve stejném množství, nemělo vliv na změny objemové hmotnosti v čerstvém stavu.

Na krychlích, jakožto zkušebních vzorcích jsme prováděli zkoušky mechanických vlastností, a to zkoušku objemové hmotnosti betonu ve ztvrdlém stavu a zkoušku pevnosti v tlaku. Vzorky byly po vytvoření odformovány a zrály 28 dní.

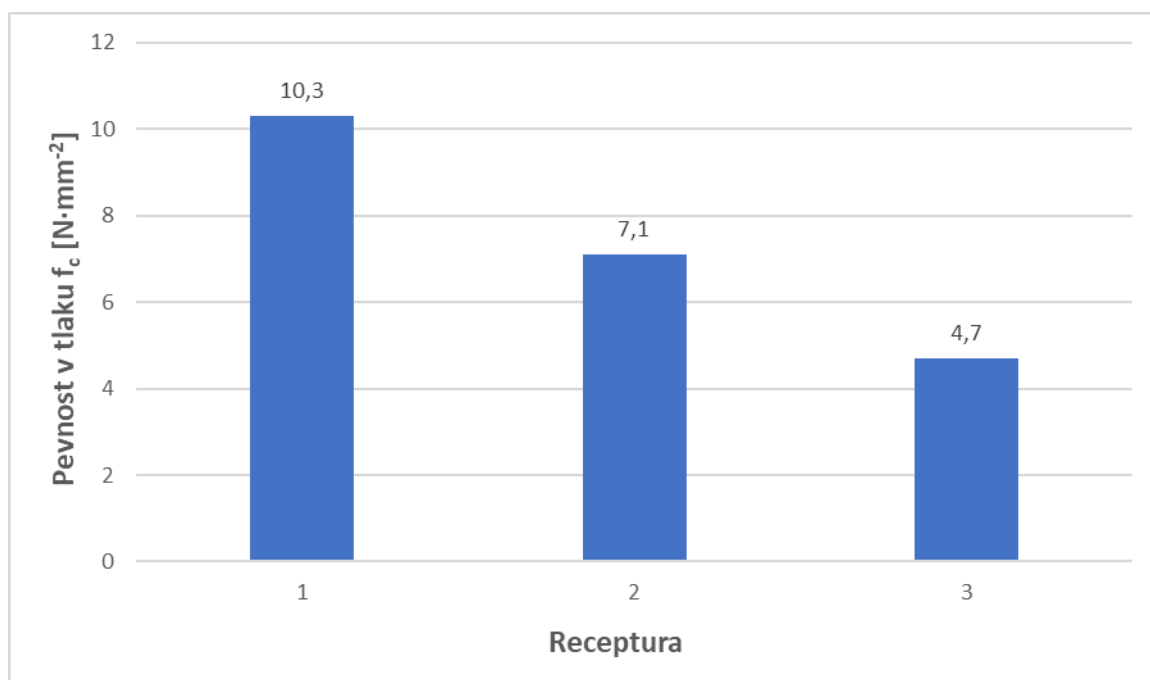
Tabulka 5: Vlastnosti ztvrdlého lehkého betonu daných receptur

Receptura	Rozměry tělesa [mm]			Hmotnost ZB m_{ZB} [kg]	Objemová hmotnost D_{ZB} [kg·m ⁻³]	Průměr D_{ZB} [kg·m ⁻³]	Síla F [kN]	Pevnost v tlaku $f_{c,ant}$ [N·mm ⁻²]	Průměr pevnosti $f_{c,mat}$ [N·mm ⁻²]
	Šířka b	Výška h	Délka L						
1	153,51	151,96	151,02	3,82	1080	1100	230	9,9	10,3
	150,31	150,84	151,41	3,80	1100		230	10,1	
	151,04	149,97	151,41	3,80	1110		245	10,8	
2	150,04	152,05	149,96	3,10	910	910	150	6,6	7,1
	147,86	151,13	151,70	3,08	910		160	7,2	
	149,49	151,20	152,05	3,11	910		170	7,5	
3	150,17	151,66	151,20	2,54	740	750	100	4,4	4,7
	150,10	150,13	150,76	2,54	750		110	4,9	
	149,96	150,39	151,54	2,58	760		105	4,7	

Graf 4: Závislost objemové hmotnosti ztvrdlého lehkého betonu na recepturách



Graf 5: Závislost pevnosti v tlaku ztvrdlého lehkého betonu na recepturách



Objemová hmotnost lehkého mezerovitého betonu ve ztvrdlém stavu se podle předpokladů zvyšuje s rostoucím množstvím cementu, stejně jak tomu bylo

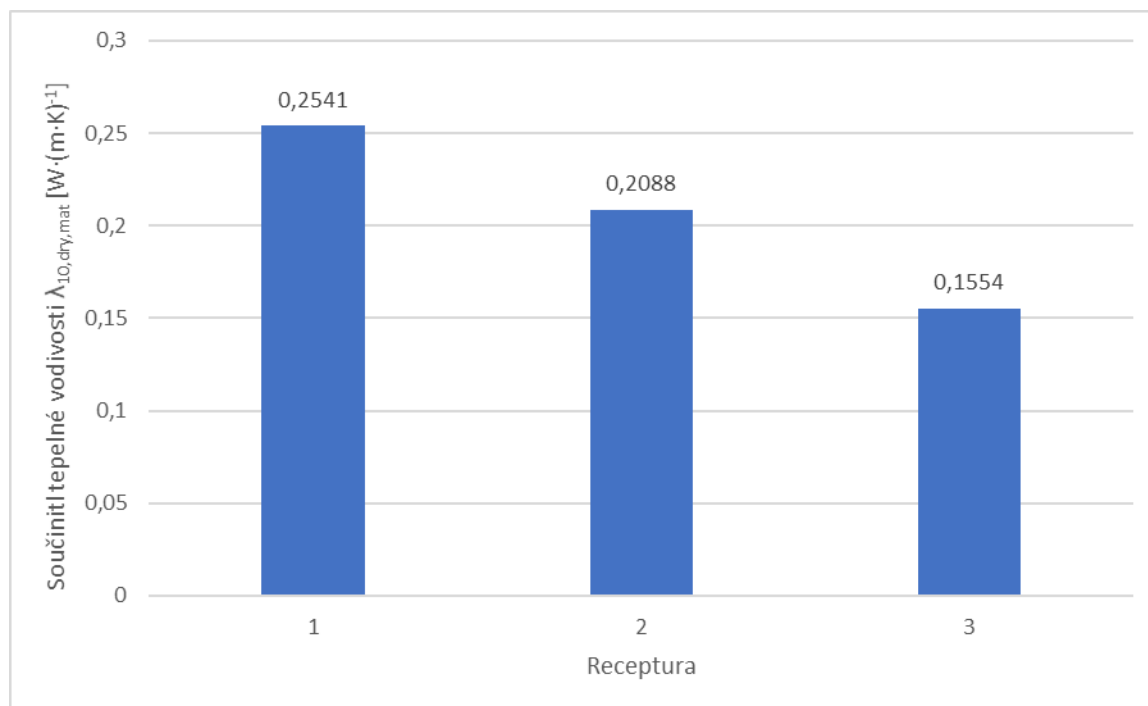
v čerstvém stavu. Pevnost v tlaku lehkého mezerovitého betonu klesá se snižujícím se množstvím cementu.

Desková tělesa byla pro zkoušku stanovení součinitele tepelné vodivosti vysušena do konstantní hmotnosti při teplotě 103 °C.

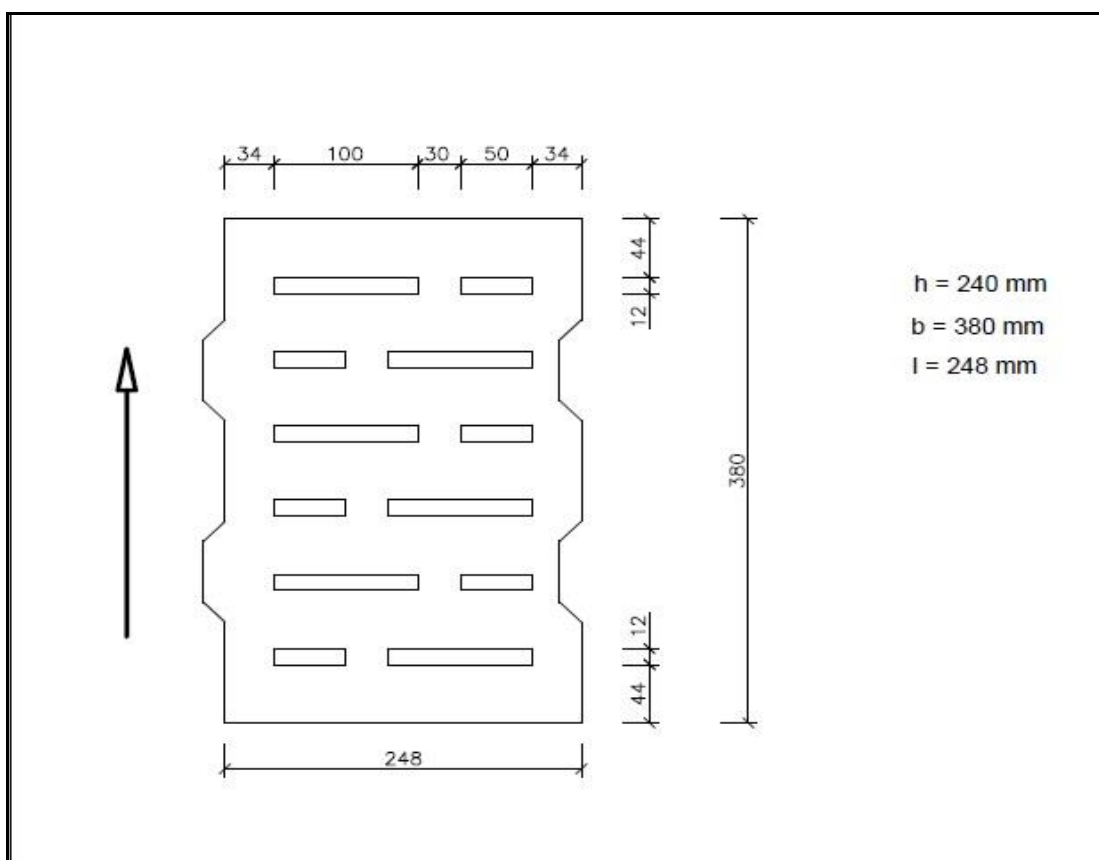
Tabulka 6: Součinitelé tepelné vodivosti u navržených receptur

Receptura	Hmotnost m [g]	Rozměry tělesa [mm]			Objemová hmotnost D_{zB} [kg·m ⁻³]	Průměr D_{zB} [kg·m ⁻³]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda_{10,dry,mat}$ [W·(m·K) ⁻¹]		Průměr $\lambda_{10,dry,mat}$ [W·(m·K) ⁻¹]
		Šířka b	Délka L	Výška h					
1	5610,70	300	302	64,686	957,4	960	0,2526	0,2477	0,2541
	5618,80	300	301	64,253	968,4		0,2659	0,2615	
2	4480,88	300	298	63,957	783,7	780	0,2221	0,2182	0,2088
	4433,03	300	300	63,610	774,3		0,2025	0,1985	
3	3596,08	301	300	63,465	627,5	625	0,1536	0,1513	0,1554
	3644,28	302	301	64,564	620,9		0,1609	0,1586	

Graf 6: Závislost součinitele tepelné vodivosti lehkého betonu na recepturách



Návrh tvarovky z betonu s pórovitým kamenivem na bázi pěnového skla o rozměrech $l \cdot b \cdot h_{unit} = 248 \cdot 380 \cdot 240$ mm. (poměrná souhrnná tloušťka příčných žebér: 20,6 %; podíl otvorů: 11,8 %). Toto tvarové uspořádání vyhovuje požadovaným vlastnostem $f_c \geq 2 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, $\lambda_{10,dry,unit} \leq 0,1 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ze zvoleného materiálu. Pevnost v tlaku f_c je poměrně zmenšena ku podílům otvorů ve tvarovce, tzn. Pokud vyšla u třetí receptury pevnost v tlaku $f_c = 4,7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$, uvažujeme pevnost v tlaku zdicího prvku $f_{c,unit} = 4,7 - (11,8 \cdot 4,7 \cdot 0,01) \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$



Obrázek 8: Tvarové uspořádání tvarovky s tloušťkou 380 mm.

9.1 Diskuze výsledků

V praktické části byli provedeny všechny zkoušky na zkušebních vzorcích pro vyhodnocení důležitých vlastností lehkého mezerovitého betonu s lehkým kamenivem na bázi pěnového skla.

Objemová hmotnost lehkého betonu v čerstvém stavu vyšla podle předpokladu, kdy s rostoucím množstvím cementu rostla i objemová hmotnost čerstvého betonu. Kvůli tomu vyšla nejvyšší hodnota objemové hmotnosti čerstvého betonu u první receptury $D_{CB} = 1180 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a nejnižší u třetí receptury $D_{CB} = 790 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Ze stejného důvodu vyšli obdobně i hodnoty objemové hmotnosti ztvrdlého betonu kdy nejvyšší hodnotu měla první receptura $D_{ZB} = 1100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a nejnižší hodnotu objemové hmotnosti ztvrdlého betonu měla receptura $D_{ZB} = 750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Další zkouškou provedenou na ztvrdlém betonu, byla zkouška pevnosti v tlaku, která je významně závislá na objemové hmotnosti.

Pevnost v tlaku s klesající hodnotou objemové hmotnosti klesala s průměrnými hodnotami první receptury $f_c = 10,3 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, druhé receptury $f_c = 7,1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a třetí receptury $f_c = 4,7 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Z toho plyne, že s rostoucím množstvím cementu roste i pevnost v tlaku ztvrdlého betonu.

U zkoušky stanovení součinitele tepelné vodivosti se výsledné hodnoty odvíjeli na vzorcích ze ztvrdlého betonu odvíjely od objemové hmotnosti. S rostoucí objemovou hmotností rostl i součinitel tepelné vodivosti, kdy nejvyšší hodnoty bylo dosaženo u receptury číslo jedna s hodnotou $\lambda_{10,dry,mat} = 0,2541 \text{ [W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$, střední hodnoty bylo dosaženo u receptury číslo dva s hodnotou $\lambda_{10,dry,mat} = 0,2088 \text{ [W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$ a nejnižší hodnoty u receptury číslo tři s hodnotou $\lambda_{10,dry,mat} = 0,1554 \text{ [W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$. Čím menší součinitel tepelná vodivosti, tím jsou lepší tepelně-izolační vlastnosti materiálu. Na základě těchto výsledků byl vytvořen graf, ze kterého jsme dostali rovnici funkce ke zjištění součinitele tepelné vodivosti tvarovky z tabulky viz. obrázek 6.

Na základě výsledků z tabulky 6, byla zvolena třetí receptura, která jako jediná vyhovuje požadavkům použitých při návrhu, tedy $f_c \geq 2 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a $\lambda_{10,dry,unit} \leq 0,1$

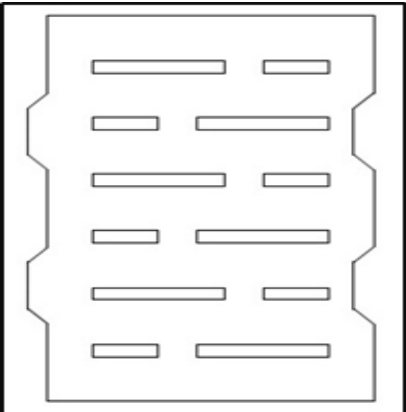
$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ a dále porovnána s hlavním konkurentem, tvarovkou z lehkého betonu na bázi keramzitu od firmy Liapor, pod názvem Liatherm.

Tabulka 7: Srovnání námi navržené tvarovky s hlavním konkurentem

Typ tvarovky pro nosné zdivo	Tloušťka b [mm]	Délka L [mm]	Výška h [mm]	Pevnost $f_{c,unit}$ [N/mm ²]	Objemová hmotnost D [kg·m ⁻³]	Ekvivalentní tepelná vodivost $\lambda_{10,dry,unit}$ [W/(m·K) ⁻¹]
Liatherm – Tvarovka s lehkým kamenivem na bázi kermazitu	365	247	240	4,0	800	0,158
Tvarovka s lehkým kamenivem na bázi pěnového skla	380	248	240	4,1	750	0,085

Při srovnání s konkurenční tvarovkou Liatherm, bylo zjištěno, že navržená tvarovka z mezerovitého betonu s lehkým kamenivem na bázi pěnového skla je nejen srovnatelná s konkurencí, ale s pevností v tlaku $f_c = 4,7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ a součinitelem tepelné vodivosti $\lambda_{10,dry,unit} = 0,085 \text{ [W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$. Výsledné vlastnosti tvarovky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 8: Tvarové uspořádání a vlastnosti tvarovky

	h [mm]	240
	L [mm]	248
	b [mm]	380
	$f_{c,mat}$ [N·mm ⁻²]	4,7
	$f_{c,unit}$ [N·mm ⁻²]	4,1
	$\lambda_{10,dry,mat}$ [W·(m·K) ⁻¹]	0,1554
	$\lambda_{10,dry,unit}$ [W·(m·K) ⁻¹]	0,0850
	D_{mat} [kg·m ⁻³]	750
	D_{unit} [kg·m ⁻³]	660

10 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce pojednává a znovuvyužití odpadních materiálu, hlavně pak použití recyklátu skla ke stavebním účelům. Praktická část se zabývá využitím pěnového skla jakožto materiálu pro výrobu zdicích prvků. Je zde popsány důležité vlastnosti zdicích prvků v rámci tepelné ochrany budov a také hlavní konkurenti, kteří jsou na trhu. Dále jsou zde popsány další lehká kameniva pro výrobu lehkého betonu, kterou jsou přímým konkurentem pěnového skla. Pěnové sklo je materiál, který se vyrábí z recyklátu skla a vytváří tak možnost znovuvyužití materiálu, který by jinak ležel na skládkách. Tato možnost znovuvyužití je hlavní výhodou pěnového skla a také se tím začleňuje do moderního trendu materiálů, které jsou vyráběny z recyklátů a v budoucnu má potenciál velkého využití. Pěnové sklo má dobré pevnostní a poměrně dobře tepelně-izolační vlastnosti, díky kterým je schopné konkurovat na trhu se zdicími prvky. Pěnové sklo je nyní využíváno jako zásypový materiál nebo jako podsyp pro základové desky pasivních domů. Jelikož cena produktů čistě z pěnového skla drahá, je kladen důraz na využití pěnového skla jako lehkého kameniva v betonech.

V praktické části byly vyrobeny vzorky z mezerovitého betonu s lehkým kamenivem na bázi pěnového skla a vyzkoušeny vlastnosti, kterými byly hlavně pevnost v tlaku a součinitel tepelné vodivosti. Dále byl vytvořen návrh tvarovky z betonu s pěnovým sklem a vypočten součinitel tepelné vodivosti.

Při srovnání s konkurenční bylo zjištěno, že vytvořený návrh tvarovky by měl mít lepší jak pevnostní i tepelně-izolační vlastnosti.

V budoucnu je velký prostor ke zlepšení zdicího prvku z betonu s pěnovým sklem, jelikož je možnost dále upravovat recepturu betonu a také je zde možnost vylepšení tvarového uspořádání prvku, kde lze i zaplnit vzduchové mezery materiálem s lepším tepelným součinitelem, než má vzduch, k dosažení lepších tepelně-izolačních vlastností.

11 LITERATURA

- [1] Vyhláška č. 268/2009 Sb.: Vyhláška o technických požadavcích na stavby [online]. Praha, 2009 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2009-268>
- [2] ČSN 730540–2 – Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2011, 56 s.
- [3] ČSN EN 1745 – Zdivo a výrobky pro zdivo – Metody stanovení tepelných vlastností. Praha: Český normalizační institut, 2012, 60 s.
- [4] Řazení otvorů v tvarovce [online]. 2011 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/crihly-tvarnice/soucasne-palene-zdici-prvky>
- [5] Zděný obal domů [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.cscm.cz/rubriky/pro-odborniky/zdeny-obal-pasivniho-domu_2921.html
- [6] ZLÁMAL, Lubomír. POZEMNÍ STAVITELSVÍ I: Svislé konstrukce. Brno, 2005. Modul. VUT.
- [7] Wienerberger-historie cihly [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://wienerberger.cz/fakta/crihla-a-jej%C3%ADD-historie>
- [8] Heluz: Keramické tvarovky [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.heluz.cz/>
- [9] Pytlík P., Sokolář R. Stavební keramika. CERM Akademické nakladatelství, Brno, 2002.
- [10] Vápeno-pískové tvarovky SENDWIX. Vápeno-pískové tvarovky SENDWIX [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.sendwix.cz/onas.html>
- [11] HELA, Rudolf. Studijní opora pro komb. st. - Modul BJ04 – M01 Technologie betonu I. Brno, 2005. 110 s. Elektronická opora
- [12] HUBERTOVIÁ, Michala. Lehký beton. Betonové konstrukce 21. století: betony s přidanou hodnotou. 2012, **2012**(7), 14.
- [13] DROCHYTKA, Rostislav. Pórobeton. Brno: VUTIUM, 1999. ISBN 80-214-1476-6.
- [14] DROCHYTKA, Rostislav: Lehké stavební látky. Brno: VUT v Brně FAST, 1993. 80-214-0514-7. [<https://intranet.fce.vutbr.cz/pedagog/predmety/opory.asp>] (CS)

- [15] Ytong: Porobeton [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.ytong.cz/produktove-skupiny.php>
- [16] Lehké betony [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://www.spsstavcb.cz/download2/633_2638_cs_15_lehke_betony.pdf
- [17] Cement [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/cement>
- [18] Výroba cementu [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.mujsbeton.cz/jak-se-vyrabi-cement>
- [19] Elektrárenský popílek [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.cezep.cz/cs/vedlejsi-energeticke-produkty/popilek>
- [20] Keramzit: Lehké kamenivo [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.liapor.cz/produkty/>
- [21] Keramzit – lehké kamenivo [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://fruto.cz/keramzit-4-8-mm-50l/z918.htm>
- [22] Perlit: Lehké kamenivo [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.perlit.cz/expandovany-perlit/>
- [23] Expandovaný obsidián – Thermosilit: Lehké kamenivo [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.thermosilit.sk/-patentovana-technologie>
- [24] BO, Chen, Wang KEQIANG a Chen XINGJUN. Study of Foam Glass with High Content of Fly Ash Using Calcium Carbonate as Foaming Agent. WEB OF SCIENCE [online]. 2012, 263-265 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do
- [25] Pěnové sklo A-GLASS. Pěnové sklo A-GLASS [online]. [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <http://www.a-glass.cz/penove-sklo/>
- [26] Pěnové sklo REFAGLASS. Pěnové sklo REFAGLASS [online]. [cit. 07.05.2017]. Dostupné z: <http://www.refaglass.cz/charakteristika/>
- [27] A-glass pěnové sklo [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.nazeleno.cz/katalog/faid_1304/a-glass-penove-sklo.aspx
- [28] Liaver pěnové sklo [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.liaver.com/liaver/materialeigenschaften/>

[29] Poraver foam glass [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.poraver.com/us/technical-data-poraver/>

[30] ČSN EN 12350-6 – Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Praha: Český normalizační institut, 2009, 10 s.

[31] ČSN EN 12390-7 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: Český normalizační institut, 2001, 10 s.

[32] ČSN EN 12390-3 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: Český normalizační institut, 2002, 18 s.

[33] ČSN 72 7012-3 – Stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu. Metoda desky. Část 3: Metoda měřidla tepelného toku. Praha: Český normalizační institut, 1994, 8 s.